



Etude des instabilités de terrain dans la mine de cobalt de Bou Azzer

Kevin Martin

► To cite this version:

Kevin Martin. Etude des instabilités de terrain dans la mine de cobalt de Bou Azzer. 2010. hal-00589604

HAL Id: hal-00589604

<https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00589604>

Submitted on 29 Apr 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



CENTRE DE GEOSCIENCES



RAPPORT D'OPTION

ETUDE DES INSTABILITES DE TERRAIN DANS LA MINE DE COBALT DE BOU AZZER

Kevin MARTIN

**Option Sol et Sous-sol
REF : O100629KMAR**

JUIN 2010

RESUME

MANAGEM, principal groupe minier privé au Maroc, opère des mines de métaux de base (zinc, plomb, cuivre et argent à Guemassa et à Draa Sfar, fluorine à El Hammam, cuivre à Akka), de métaux précieux (argent à Imiter, or à Akka), ainsi que des métaux de spécialité (cobalt à Bou Azzer, oxydes de zinc dans le Haut Atlas). Depuis bientôt un siècle, la mine de Bou Azzer est une des rares mines au Monde exploitée spécifiquement pour le cobalt ; la production y est assurée sur 8 sièges souterrains, répartis sur une distance d'environ 50 km dans la boutonnière de Bou Azzer, au sud de la ville de Tazenakht dans l'Anti-Atlas. Bou Azzer rencontre, dans certains de ses chantiers, des instabilités qui rendent difficile leur exploitation.

Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est :

- d'analyser les problèmes d'instabilité mécanique rencontrés dans les différents sièges de la mine ;
- d'établir une typologie de ces risques en fonction du contexte géologique et géométrique spécifique à chaque structure, et de proposer un mode de soutènement pour chaque type de risque ;
- de développer un (ou des) indicateur(s) facilement quantifiable(s) pour adapter le type de soutènement retenu aux conditions spécifiques d'une zone à conforter (par exemple, adapter la densité de boulonnage pour les types de risques pour lesquels le soutènement par boulonnage sera la solution de référence) ;
- finalement, pour des cas où aucune solution de soutènement n'apporterait une réponse satisfaisante, d'examiner les possibilités de changement de méthode d'exploitation pour limiter ou éliminer les risques d'instabilités.

Les indicateurs provenant de la littérature ont permis de classer les différents terrains existant dans la mine de manière empirique. Cette classification donne une bonne première idée des méthodes de soutènement à mettre en place dans une grande majorité des cas. Toutefois, cela ne suffit pas toujours. Dans certains cas, pour certaines zones à risques, il convient d'utiliser d'autres outils tels que le calcul numérique par exemple pour préciser le soutènement à adopter. Ces méthodes ont permis de résoudre le problème de la mine dans certaines situations particulièrement difficiles. Les solutions proposées ont alors été chiffrées et ont montré qu'elles étaient viables économiquement.

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier tout particulièrement Damien Goetz qui m'a permis de réaliser ce travail d'option. Sa compréhension et son expérience de l'industrie minière m'ont beaucoup apporté durant la réalisation de ce projet.

Je tiens également à remercier vivement certaines personnes de Bou Azzer, qui m'ont réservé un accueil chaleureux, et qui se sont rendues disponibles pour répondre à mes nombreuses questions. Merci à MM. Boutyb, Hadit, Rami et bien d'autres.

Merci également à M. Akalay qui a rendu ce travail possible.

Merci enfin à M. Boujnane, qui m'a accompagné et permis de me sentir à l'aise durant cette période, autant dans le travail que pendant le temps libre sur le site.

SOMMAIRE

RESUME.....	3
REMERCIEMENTS.....	4
SOMMAIRE.....	5
INTRODUCTION.....	6
 PREMIERE PARTIE : PRESENTATION GENERALE DE L'ACTIVITE MINIERE DE BOU AZZER.....	 7
1 Organisation de Managem.....	8
2 Caractéristiques des gisements.....	9
3 Reconnaissance géologique.....	10
4 La méthode d'exploitation fond.....	11
5 Le traitement.....	12
5.1 Fonctionnement de la laverie.....	12
5.2 Fonctionnement du grillage.....	13
5.3 Fonctionnement de l'Hydro 2.....	14
 DEUXIEME PARTIE : LES INSTABILITES MECANIQUES.....	 15
1 Caractérisation et classification géomécanique des terrains de Bou Azzer.....	16
1.1 La classification RMR (Rock Mass Rating).....	16
1.2 Le Q-system de N. Barton.....	17
1.3 La méthode.....	18
1.4 Les résultats.....	18
2 Techniques de soutènement actuellement utilisées à Bou Azzer.....	21
2.1 Le boisage.....	21
2.2 Les cintres métalliques.....	22
2.3 Différents types de boulons.....	23
2.4 Les grillages et treillis soudés.....	26
3 Etude des situations « à problèmes ».....	27
3.1 L'Axe Milon N250 de Bouismass.....	27
3.2 Le Croiseur 2 N325 d'Aghbar.....	36
3.3 La Structure CM N260 de Bou Azzer Est (Puits V).....	44
 CONCLUSION.....	 49
BIBLIOGRAPHIE.....	50
LISTE DES FIGURES.....	51
ANNEXES.....	52
TABLE DES MATIERES.....	56

INTRODUCTION

MANAGEM, principal groupe minier privé au Maroc, opère des mines de métaux de base (zinc, plomb, cuivre et argent à Guemassa et à Draa Sfar, fluorine à El Hammam, cuivre à Akka), de métaux précieux (argent à Imiter, or à Akka), ainsi que des métaux de spécialité (cobalt à Bou Azzer, oxydes de zinc dans le Haut Atlas). Depuis bientôt un siècle, la mine de Bou Azzer est une des rares mines au Monde exploitée spécifiquement pour le cobalt ; la production y est assurée sur 8 sièges souterrains, répartis sur une distance d'environ 50 km dans la boutonnière de Bou Azzer, au sud de la ville de Tazenakht dans l'Anti-Atlas.

Les minéralisations cobaltifères se présentent essentiellement sous formes de filons à fort pendage, de puissance variable, et qui se développent dans un environnement géologique immédiat variable (diorite, serpentine, ...). L'exploitation est régulièrement confrontée à des problèmes de tenue de terrains, les incidents enregistrés pouvant être de nature assez différente. Ces incidents présentent évidemment un risque qu'il convient avant tout de limiter autant que possible pour la sécurité du personnel, mais qui a également des conséquences en termes de productivité des chantiers, et donc de coûts d'exploitation.

Dans un premier temps, l'activité minière de Bou Azzer sera détaillée afin de complètement s'imprégner du domaine d'étude. Il s'agira d'une présentation plus précise de la mine indispensable pour maîtriser les enjeux et les fondements de ce travail. Les différentes instabilités mécaniques rencontrées à Bou Azzer seront au centre d'une deuxième partie dans laquelle les terrains seront d'abord caractérisés et classés selon diverses méthodes, puis certaines situations « à problèmes » seront étudiées précisément afin de leur trouver des solutions.

PREMIERE PARTIE

-

PRESENTATION GENERALE DE L'ACTIVITE

MINIERE DE BOU AZZER

1 Organisation de Managem

Le Groupe Managem est le principal groupe minier et hydrométallurgique privé du Maroc. Il s'agit d'une filiale du Groupe ONA. Il opère des mines de métaux de base (zinc, plomb, cuivre et argent à Guemassa et à Draa Sfar, fluorine à El Hammam, cuivre à Akka), de métaux précieux (argent à Imiter, or à Akka), ainsi que des métaux de spécialité (cobalt à Bou Azzer, oxydes de zinc dans le Haut Atlas). Le schéma organisationnel du groupe se trouve en figure 1.

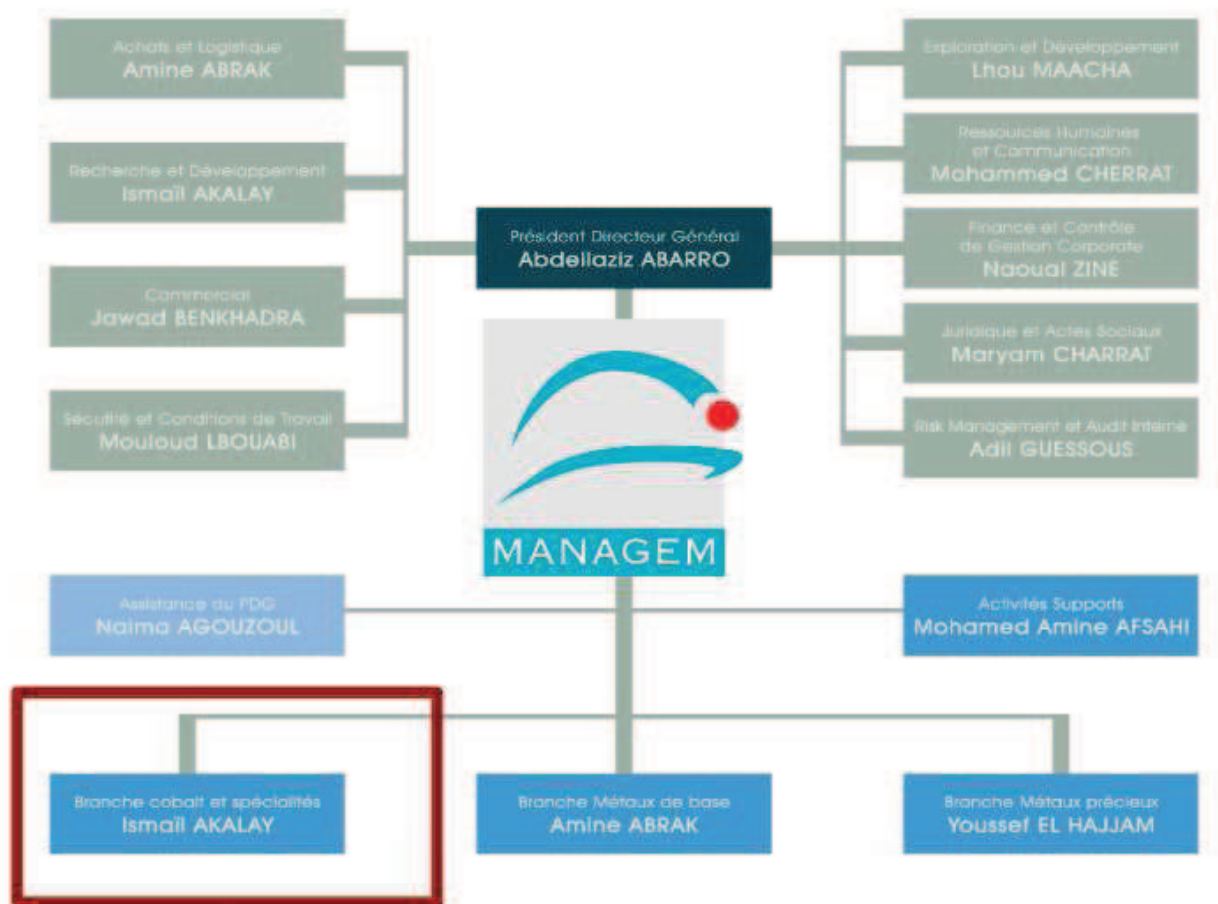


Figure 1: Schéma organisationnel de Managem

La mine de Bou Azzer est exploitée par la Compagnie Tifnout Tiranimine (CTT) qui dépend de la branche « cobalt et spécialités », c'est une des rares mines au Monde exploitée spécifiquement pour le cobalt. La Compagnie Tifnout Tiranimine regroupe le site minier de Bou Azzer et le site de l'hydrométallurgie à Guemassa. Le concentré gravimétrique qui est produit à la laverie sur le site de la mine est transporté à Guemassa pour être traité afin de produire du cobalt électrolytique.

2 Caractéristiques des gisements

La mine de Bou Azzer se situe sur la boutonnière du même nom, dans l'Anti-Atlas marocain, 180 km au sud de Ouarzazate. Cette boutonnière se trouve sur la faille anti-atlasique centrale et regroupe des fenêtres de terrains précambriens dans des terrains paléozoïques. Les différents gisements de la mine de Bou Azzer se trouvent au contact de serpentines pour la majorité des cas. Les minéralisations sont des filons minces, qui se sont formés dans les failles et les fractures, où se sont retrouvés les fluides exogènes froids et les fluides profonds plus chauds, ceux-là ayant lessivé le cobalt contenu dans les serpentines.



Figure 2: Localisation de la mine de Bou Azzer

La caractéristique de la mine de Bou Azzer est donc d'être constituée de plusieurs gisements indépendants se répartissant sur une zone d'environ cinquante kilomètres de long. Chaque gisement a des caractéristiques qui lui sont propres, tant au niveau des épontes que de la minéralisation.

Managem exploite actuellement les gisements suivants : Puits III, Bouismass, Agoudal, Agoudal Est, Bou Azzer Est, Aghbar, Taghouni et Filon II. La production est de

15000 t_{ttv}/mois, à une teneur moyenne d'environ 1 %, ce qui fait environ 130 t_{métal}/mois. Sur ces chiffres, Bouismass représente 25 %, Bou Azzer Est et Aghbar 20 % chacun. Ces gisements sont des gisements de cobalt, mais sous diverses formes de minéraux, qui sont répertoriées dans le tableau suivant ainsi que les minéraux non cobaltifères fortement présents :

Tableau : Minéraux présents à Bou Azzer

Nom	Formule
Safflorite	CoAs ₂
Skuttérudite	(Co,Ni,Fe)As ₃
Löllingite	FeAs ₂
Nickeline	NiAs ₂
Cobaltite	CoAsS
Arsenopyrite	FeAsS
[...]	[...]

En ce qui concerne la gangue, elle est constituée majoritairement de quartz (SiO₂) ou de calcite (CaCO₃).

3 Reconnaissance géologique

La reconnaissance de ces gisements est effectuée par le service géologie de Bou Azzer. Ce dernier fournit des cartes des différentes minéralisations. Ces minéralisations sont « touchées » par sondage, puis « criblées » afin d'en connaître les caractéristiques de type puissance moyenne et extension de la structure. Les seules teneurs analysées systématiquement au niveau des minéralisations découvertes sont la teneur en cobalt de la minéralisation, et la teneur en cobalt du concentré obtenu après battée du minerai par le service géologie. Cette battée est effectuée afin d'estimer la teneur du concentré qui sera produit à partir du tout venant au niveau de la laverie.

Le traitement effectué à la laverie est un traitement essentiellement gravimétrique. Les minéraux qui ont été cités plus haut ayant une densité voisine, ils ne seront pas séparés. Or tous ces minéraux ne présentent pas la même proportion de cobalt, il en existe même certains (FeAs₂, NiAs₂, FeAsS...) qui n'en contiennent pas du tout. Selon la proportion de chaque minéral dans le minerai, celui-là donne un concentré dont la teneur en cobalt varie. L'analyse de la teneur en cobalt du concentré après battée permet donc de renseigner le service géologie sur la minéralogie du minerai. Par exemple, un minerai contenant surtout de la löllingite aura une teneur de concentré plus faible qu'un minerai riche en safflorite puisqu'elle est très riche en cobalt et que la löllingite n'en contient pas.

Les teneurs en fer et en arsenic ne sont pas analysées systématiquement lors de l'établissement des ressources. Mais ces deux éléments sont très présents dans le minerai.

4 La méthode d'exploitation fond

La méthode d'exploitation utilisée à Bou Azzer est celle des Tranches Montantes Remblayées (TMR). Cette méthode coûteuse à l'avantage d'être sélective. Elle permet également une récupération totale du minerai, et dans la majorité des cas, elle est sécuritaire. Le principe de cette méthode est le suivant. L'exploitation s'effectue par panneaux d'une hauteur allant en général de 40 m à 50 m selon les chantiers. Ces panneaux s'étendent sur toute la longueur de la minéralisation, de l'ordre de 50 m. La largeur du panneau, elle, est fonction de la puissance de la minéralisation ainsi que des dimensions des engins.

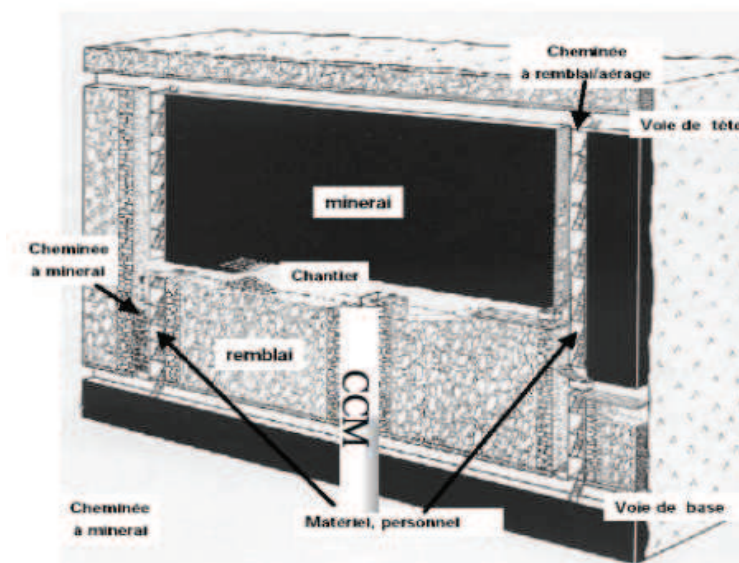


Figure 3: Schéma explicatif de la méthode d'exploitation par TMR

Comme on peut le voir sur la figure 3 ci-dessus, le panneau est tout d'abord tracé en suivant la minéralisation, c'est le niveau de base. Ensuite, il faut creuser et mettre en place des passages personnels, en général aux deux extrémités du panneau, ainsi qu'une cheminée à remblai (CR). L'étape suivante consiste à abattre une tranche de minerai sur une hauteur de l'ordre de 2 m et une largeur de 1,20 m, puis, souvent, à soutenir le minerai en place, puis à déblayer à l'aide d'un micro-scoop. Une fois le déblayage terminé, il faut remblayer, toujours grâce au micro-scoop, avec du remblai acheminé depuis l'extérieur via la cheminée à remblai. Pendant le remblayage, il faut bien prendre soin de reconstituer une cheminée à minerai (CM) à l'aide de panneaux métalliques. Une fois le remblayage effectué, les opérateurs peuvent monter dessus afin d'abattre la tranche suivante et de reproduire le même cycle opératoire jusqu'à se trouver à une certaine distance du niveau supérieur. On laisse alors un stot en place sur toute la longueur, pour assurer la stabilité des niveaux, ce stot est bien entendu perdu.

Ces tailles sont omniprésentes à Bou Azzer. Le forage est manuel alors que les étapes de déblayage et remblayage sont mécanisées. Le micro-scoop utilisé, de par son volume, impose d'ouvrir sur au moins 1,20 m d'épaisseur. La minéralisation faisant en moyenne 80 cm sur les différents chantiers de Bou Azzer, on est obligé de diluer le minerai avec son encaissant lors de l'abattage. Lors du déblayage, si le remblai inférieur n'a pas été protégé contre le mélange avec le minerai, on dit qu'on salit le minerai, c'est le cas à Bou Azzer. Lors du passage à la tranche supérieure, le micro-scoop nécessite une ouverture de 2 m, on abat donc une nouvelle fois pour élargir le passage, c'est le déflinquage. L'encaissant ainsi abattu sert de remblai pour pouvoir passer à la tranche suivante.

Le Tout Venant (TV), minerai abattu, dilué et sali, est collecté via les cheminées à minerai dans la salle de chargement, à partir de laquelle il est roulé par wagon puis extrait par skip et enfin débardé dans les alvéoles de stockage de la laverie, situées au pied du Puits III.

5 Le traitement

5.1 Fonctionnement de la laverie

Cette laverie se trouve sur site, le traitement gravimétrique qui y est effectué comporte les grandes étapes suivantes :

- ✓ acheminement du minerai des alvéoles de stockage jusqu'au concasseur primaire par scraper ;
- ✓ concassage primaire (à mâchoires) puis concassage secondaire (conique) ;
- ✓ traitement par jigs : le matériel est alors divisé en trois parties, le concentré, le stérile et les mixtes. Seuls les mixtes sont convoyés vers la suite du traitement ;
- ✓ broyage dans des broyeurs à barres ;
- ✓ séparation gravimétrique dans les spirales : le matériel est alors divisé en trois parties, le concentré, le stérile et les mixtes. Seuls les mixtes sont convoyés vers la suite du traitement ;
- ✓ séparation par tables à secousses ;
- ✓ le stérile des tables est ensuite flotté pour être épuisé ;
- ✓ roulage du concentré jusqu'aux alvéoles où il est stocké en vrac.

Le flow sheet simplifié de la laverie tel qu'il est décrit plus haut est représenté en figure 4 :

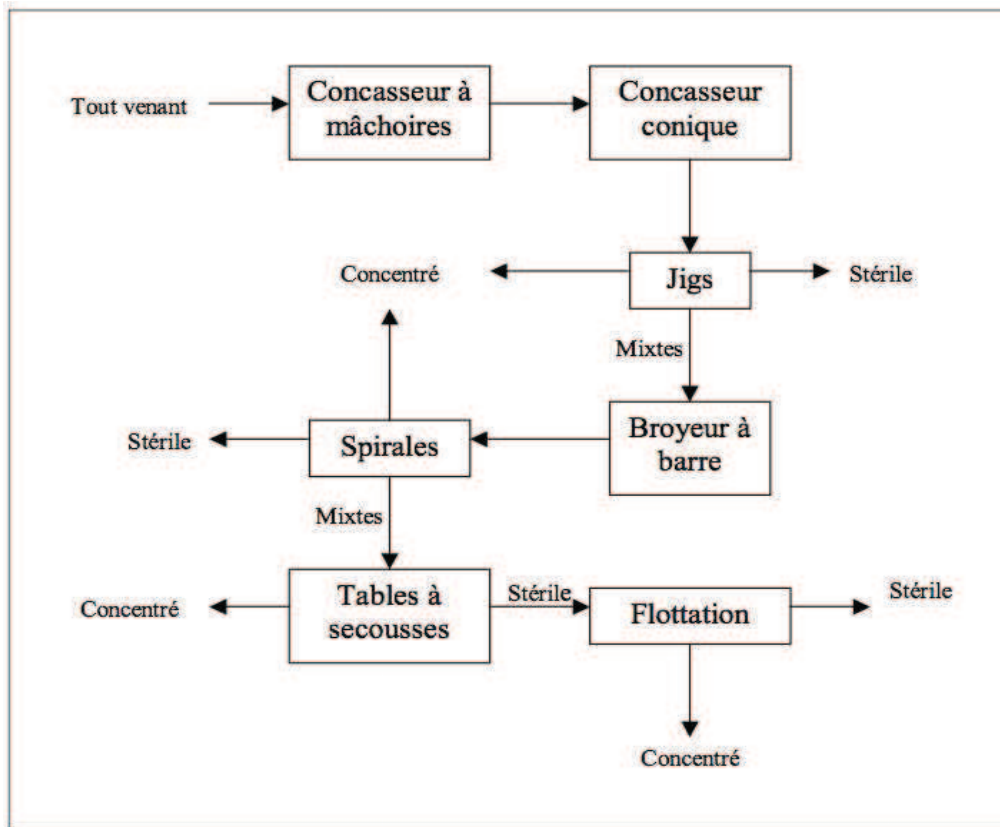


Figure 4: Flow sheet simplifié de la laverie

5.2 Fonctionnement du grillage

L'usine de grillage se situe sur le site CTT Guemassa. Le but de ce grillage est de rendre le concentré lixiviable. Il permet d'oxyder l'arsenic contenu dans le tout venant et de transformer les arséniures de cobalt (CoAs_x) en arséniate de cobalt ($\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2$). Cette étape permet de plus de concentrer le produit, qui passe de la teneur gravimétrique de 7,5% à une teneur de l'ordre de 10 % à 12 %. Cette concentration est obtenue grâce au dégagement de trioxyde d'arsenic (As_4O_6), qui est récupéré condensé puis valorisé en bout de chaîne.

Le procédé est le suivant, et le flow sheet simplifié est schématisé sur la figure 5 :

- ✓ le concentré gravimétrique est acheminé des alvéoles dans les trémies d'alimentation par pelles ;
- ✓ il passe dans un sécheur, le taux d'humidité passe de 4 % à 0,2 % ;
- ✓ il est ensuite passé au crible à 600 μm , le passant est stocké, et le refus passe dans un broyeur à barres avant de retourner en amont du crible ;

- ✓ le tout est ensuite envoyé dans un four à lit fluidisé qui produit du grillé ($\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2$) solide et des gaz ($\text{As}_4\text{O}_6 + \text{H}_2\text{O}$) ;
- ✓ une séparation gaz/solide est effectuée par cyclones, et les gaz passent dans un électrofiltre puis sont condensés dans un mélangeur par injection d'air frais.

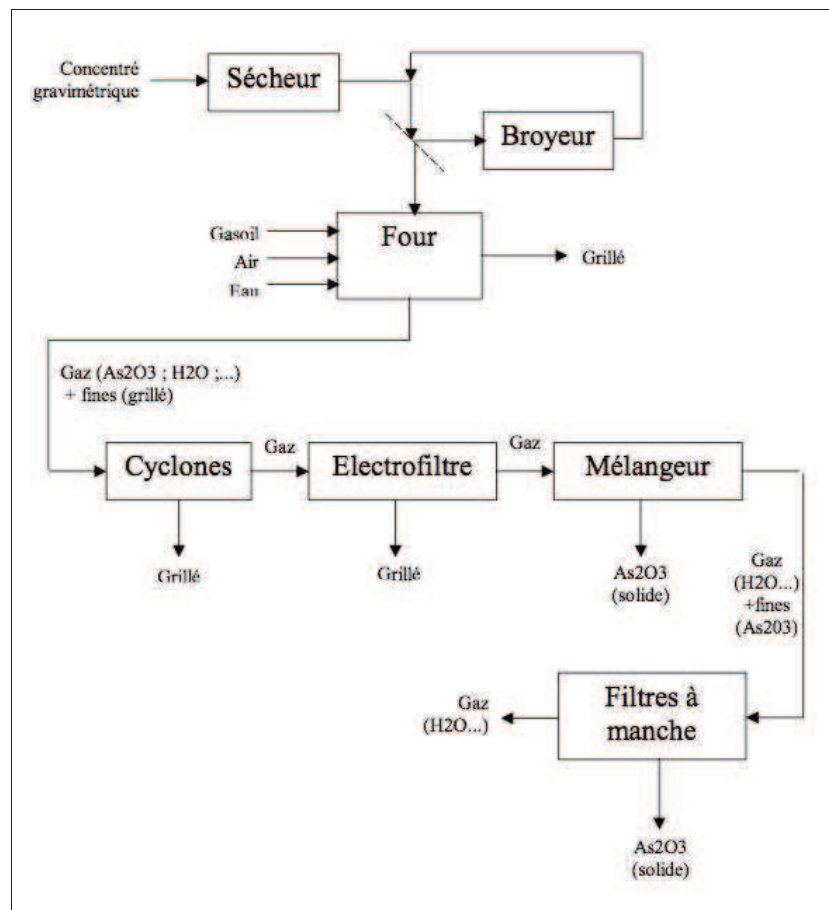


Figure 5: Flow sheet simplifié du grillage

5.3 Fonctionnement de l'Hydro 2

L'Hydro 2 est l'usine de CTT Guemassa qui traite le grillé pour produire les cathodes de cobalt. Le procédé très simplifié est le suivant et les flow sheets des étapes se trouvent en annexe :

- ✓ le grillé est mis en solution ;
- ✓ le jus passe dans l'atelier extraction liquide/liquide qui sert à éliminer le nickel et à découpler les flux entre la mise en solution et l'électrolyse ;
- ✓ l'électrolyse produit la cathode à partir d'une solution aqueuse concentrée.

DEUXIEME PARTIE

-

LES INSTABILITES MECANIQUES

A BOU AZZER

Cette deuxième partie est la plus importante de ce rapport. Dans une première sous-partie, je vais caractériser et classer les différents terrains rencontrés à Bou Azzer. Ensuite, je ferai le point sur les techniques de soutènement actuellement disponibles et utilisées sur les chantiers. Enfin, j'étudierai en détail certaines situations jugées « à problèmes », aussi appelées « tailles chocs » présentes à Bou Azzer.

1 Caractérisation et classification géomécanique des terrains de Bou Azzer

Depuis de nombreuses années, des chercheurs ont proposé, sous forme de classifications, des synthèses dont l'objectif était de déterminer le soutènement adapté en fonction de critères géomécaniques (Protodiakonov en 1909, Terzaghi en 1946 et Lauffer en 1958). Plus récemment, Bieniawski (1973) et N. Barton (1974) ont proposé deux classifications géomécaniques : le RMR et le Q-system, dont le principe est de décrire de manière détaillée le massif au sein duquel est creusé l'ouvrage et de déterminer à partir de cette description la classe de soutènement adéquate. Avant de détailler chacune de ces classifications et de les appliquer aux massifs de Bou Azzer, il est important de souligner que leur principal intérêt est de contraindre l'ingénieur à une description exhaustive et quantitative du massif encaissant, mais que, en ce qui concerne le choix du soutènement, il faut savoir les utiliser avec discernement et être conscient des limites propres à chacune de ces classifications. En effet, d'autres considérations (économiques, propres au site et à l'environnement, liées à la méthode d'exploitation...) peuvent avoir leur mot à dire sur le choix définitif. Les méthodes empiriques représentent ainsi le point de départ de l'évaluation qualitative et quantitative du soutènement : en effet, une étude globale réunissant des approches empiriques, analytiques et numériques devra être menée afin de permettre une compréhension suffisante des phénomènes en jeu.

Je vais donc appliquer ces deux méthodes (RMR de Bieniawski et Q-system de N. Barton) pour fournir une classification des différents types de roche rencontrés à Bou Azzer. Je comparerai ensuite avec ce qui a été fait par le passé, afin de le confirmer ou non et compléterai ainsi la base de données.

1.1 La classification RMR (Rock Mass Rating)

La classification RMR de Bieniawski prend en compte les cinq paramètres géotechniques ci-dessous :

- la résistance à la compression simple de la matrice rocheuse ;
- l'indice de fissuration RQD ;
- l'espacement entre les discontinuités ;
- les caractéristiques des discontinuités (ouverture, continuité, rugosité,

remplissage...);

- les conditions hydrogéologiques.

Pour chacun de ces paramètres, un indice est attribué en suivant les valeurs dans le tableau présenté en figure 6 :

Paramètres		Gammes de valeurs						
1	Résistance à la compression simple de la roche intacte	1-3 MPa	3-10 MPa	10-25 MPa	25-50 MPa	50-100 MPa	100-200 MPa	> 200 MPa
	Indice	0	1	2	4	7	12	15
2	Indice de carottage RQD	< 25 %			25-50 %	50-75 %	75-90 %	90-100 %
	Indice	3			8	13	17	20
3	Espacement des joints	< 0,05 m			0,05-0,3 m	0,3-1 m	1-3 m	> 3 m
	Indice	5			10	20	25	30
4	Caractéristiques des joints	rugueux non continu sans ouverture épontes résistantes			assez rugueux ouverture < 1 mm épontes résistantes	assez rugueux ouverture < 1 mm épontes tendres	Remplissage < 5 mm ouverture 1-5 mm continu	Remplissage > 5 mm ouverture > 5 mm continu remplissage tendre
	Indice	25			20	12	6	0
5	Venues d'eau	Débit sur 10 m de longueur			pas de débit	< 25 l/mn	25-125 l/mn	> 125 l/mn
		Rapport : pression eau/contrainte principale			0	0-0,2	0,2-0,5	> 0,5
		Conditions générales			terrains très secs	eau interstitielle	eau à faible pression	problèmes d'eau
	Indice			10	7	4	0	

Figure 6: Paramètres géotechniques et indices associés pour le calcul du RMR

Une fois chacun des indices attribué, l'indice global RMR est obtenu en les additionnant un à un. Il suffit ensuite d'ajuster cet indice en appliquant un facteur correctif pour tenir compte de l'influence de l'orientation des discontinuités.

1.2 Le Q-system de N. Barton

Le principe de cette classification est le même : à partir d'indices élémentaires, on définit un indice global appelé Rock Mass Quality et noté Q. Il vaut :

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF}$$

- RQD est l'indice de fissuration ;
- J_n est relatif au nombre de familles de fissures ;
- J_r est un indice fonction de la rugosité des fissures ;
- J_a est un indice exprimant le niveau d'altération des fissures ;
- J_w est un facteur de réduction pour prendre en compte la présence d'eau ;

- SRF est un facteur de réduction pour tenir compte des contraintes naturelles.

Les modalités pour trouver ces indices sont détaillés dans le livre de J. Fine. Le rapport RQD/Jn représente une estimation de la taille des blocs et caractérise la structure du massif rocheux. Le rapport Jr/Ja traduit les caractéristiques de rugosité et de frottements des épontes de la fissure ou du matériau de remplissage. Le troisième rapport exprime les contraintes actives (pression d'eau et environnement de la roche).

1.3 La méthode

A chaque visite sur les chantiers, j'ai relevé les caractéristiques nécessaires à l'établissement de ces deux indicateurs pour les roches rencontrées. J'ai effectué cela pour différentes roches, et pour certaines roches, j'ai fait ce travail dans différents chantiers. J'ai réévalué le RQD de certaines de ces roches lorsque les caisses de carottes correspondantes à la roche et au lieu qui m'intéressaient étaient disponibles.

En ce qui concerne la résistance à la compression simple, je n'ai pas mené d'essais complémentaires. J'ai seulement utilisé les données dont disposait Managem avec un regard critique bien entendu.

1.4 Les résultats

Voici la liste des roches que j'ai recensées accompagnées du ou des noms des sites où je les ai observées :

- Diorite : Axe Milon de Bouismass et Filon 5 de Puits III ;
- Diorites altérées : Structure CM du Puits V de Bou Azzer Est ;
- Serpentes : Structure CM du Puits V de Bou Azzer Est et Filon 5 de Puits III ;
- Rhyolites : galeries permanentes d'Aghbar ;
- Rhyolites altérées : Croiseur 2 d'Aghbar ;
- Minerai : Croiseur 2 d'Aghbar et Axe Milon de Bouismass ;
- Serpentes carbonatées dans une bonne partie des chantiers ;
- Pérites d'Agoudal.

La figure 7 présente ces différentes roches dans les différentes zones d'observation avec leurs indices RMR et Q.

Roche	Site	RMR		Q de N. Barton	
Diorites	Axe Milon Bouismass N250	84	Terrain très résistant	427	Exceptionnellement bon
	Filon 5 Puits III N380	84	Terrain très résistant	213	Particulièrement bon
Diorites altérées	Structure CM Bou Azzer Est Puits V N260	31	Terrain de mauvaise résistance	0,03	Extrêmement mauvais
Serpentines	Filon 5 Puits III N380	19	Terrain de très mauvaise résistance	0,01	Extrêmement mauvais
	Structure CM Bou Azzer Est Puits V N260	19	Terrain de très mauvaise résistance	0,01	Extrêmement mauvais
Rhyolites	Aghbar	87	Terrain très résistant	480	Exceptionnellement bon
Rhyolites altérées	Croiseur 2 Aghbar N325	31	Terrain de mauvaise résistance	0,02	Extrêmement mauvais
Minerai	Axe Milon Bouismass N250	27	Terrain de mauvaise résistance	0,01	Extrêmement mauvais
	Croiseur 2 Aghbar N325	31	Terrain de mauvaise résistance	0,02	Extrêmement mauvais
Pélites	Agoudal	41	Terrain de moyenne résistance	60	Bon

Figure 7: Classification des différentes roches de Bou Azzer selon le RMR et le Q-system

On retrouve certaines caractéristiques que connaissent déjà les mineurs de Bou Azzer. La diorite et la rhyolite sont des roches résistantes alors que la serpentine et les roches « dures » mais altérées sont de très mauvaise tenue. On remarque également qu'une roche dans un chantier possède à peu près les mêmes caractéristiques du point de vu de ces indicateurs que dans un autre chantier où elle se trouve. Notons toutefois que dans ce tableau ne figurent que des minerais de mauvaise résistance alors que dans certains chantiers le minerai est très compétent et peu fissuré.

Cette étude sert essentiellement à fournir une évaluation qualitative de chaque type

de roche, permettant d'anticiper le niveau de difficulté attendu dans la tenue de terrains dans une zone donnée. Elle permet aussi de proposer un soutènement pour les galeries classiques où l'encaissant n'est composé que d'une seule de ces roches ; pour cela, il suffit de s'appuyer sur les solutions proposées dans leurs ouvrages par les auteurs de ces classifications. En revanche, il n'est pas possible d'appliquer cette méthode « des indicateurs » pour dimensionner un soutènement dans les tailles de Bou Azzer qui sont des situations plus complexes mettant en jeu au moins deux roches différentes (au moins le minéral et la roche encaissante). Toutefois, les simulations numériques à faire nécessitent d'utiliser les caractéristiques en masse du massif rocheux et non celles de la matrice rocheuse. Un logiciel à Bou Azzer permet de faire cette conversion, il s'agit de Roclab. Il s'appuie sur le même type d'informations que celui qui sert à définir les indicateurs RMR et Q de N. Barton. Le recueil de ces informations ayant maintenant été fait, il devient possible de faire des simulations intéressantes.

2 Techniques de soutènement actuellement utilisées à Bou Azzer

2.1 Le boisage

Le soutènement par boisage est très ancien et a toujours été apprécié du mineur qui peut le voir travailler à l'oeil grâce aux fissures qui s'y créent progressivement. La mine de Bou Azzer utilise le boisage comme soutènement sous différentes formes. Tout d'abord, dans les galeries, la forme la plus utilisée du boisage à Bou Azzer est le cadre. Il se compose essentiellement de deux bois verticaux appelés montants ou pieds, et d'un bois horizontal appelé chapeau.

Ensuite, suivant la nature des terrains, peuvent s'ajouter les éléments secondaires suivants. Les poussards sont des entretoises placées entre deux montants successifs qui assurent la stabilité des cadres dans l'axe de la galerie. Le garnissage est généralement constitué par des planches que l'on place entre les cadres et le terrain pour retenir les terrains entre deux cadres consécutifs. A Bou Azzer, ces cadres sont utilisés sur des largeurs maximales d'ouvertures de 2 m. Le calcul de la charge admissible d'un tel cadre s'effectue en première approximation en le considérant comme un portique, et en considérant de manière indépendante le chapeau et les montants.

Une autre forme de boisage utilisée à Bou Azzer est la pile de bois. Ces piles de bois sont utilisées dans les zones de large ouverture pour soutenir la couronne comme les carrefours ou les tailles où un surplomb apparaît lors de la forte diminution du pendage de la structure. Ces piles sont constituées par des empilages entrecroisés de bois. Ce genre de pile de bois peut supporter en général plusieurs centaines de tonnes. En tailles, le boisage est régulièrement mis en œuvre sous forme de poussards entre les épontes dans les zones de faible ouverture pour ralentir la convergence des terrains, empêcher la fermeture de la taille et/ou retenir les blocs susceptibles de tomber selon les chantiers. La Figure 8 montre ces 2 types de soutènement par boisage.

En ce qui concerne les dimensions, Bou Azzer dispose de bois à section circulaire de diamètre allant de 8 cm à 25 cm. Les longueurs usuelles varient de 1 m à 2,5 m. Il faut noter que le bois nécessite un bon aérage, sinon il a tendance à pourrir et donc perdre sa résistance. Ce pourrissement s'accompagne souvent d'émissions de CO₂, voire de CO.



Figure 8: Différentes utilisations du boisage à Bou Azzer : a) piles de bois b) poussards

2.2 Les cintres métalliques

Le soutènement métallique a historiquement pris la place du boisage. Il est très utilisé dans les cas difficiles. Le cintre a l'avantage d'exercer une pression de confinement bien répartie sur tout le pourtour de la galerie. Il est très rassurant, car il peut résister à de grandes déformations sans se rompre, le mineur peut ainsi l'observer et prendre en temps utile les mesures nécessaires.

Les cintres utilisés à Bou Azzer ont des profils « Oméga » avec des masses linéaires de 16,5 kg/m et 21 kg/m. Ces cintres sont en forme de voûte, ils sont principalement utilisés dans les galeries permanentes de section allant de 5 m² à 12 m², à cause de la difficulté de leur mise en place. Les cintres sont constitués de plusieurs (de 2 à 4 en général) éléments assemblés entre eux, d'entretoises empêchant le basculement du cintre dans la direction de la galerie et de semelles empêchant les pieds de s'enfoncer dans le terrain.

Les cintres sont préférés aux cadres en bois pour les ouvrages permanents donc, mais lorsque l'ouverture dépasse 2 m de large. Ils ont une meilleure portance que les cadres en bois, ils sont donc préférés dans des zones très sollicitées où l'utilisation du boisage nécessiterait un espacement très faible entre deux cadres, et engendrait donc un coût très élevé. Cependant, les cintres peuvent être associés à un garnissage boisé pour retenir le terrain entre deux arches.

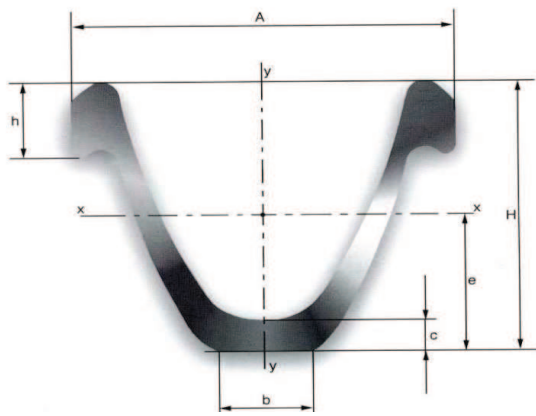


Figure 9: a) Profil "Oméga" d'un cintre b) Photo de cintres avec garnissage boisé dans une galerie permanente

2.3 Différents types de boulons

La cellule géotechnique a été lancée en 2007. Avant cela, la consommation mensuelle de boulons quels qu'ils soient était de l'ordre de la centaine selon les chiffres de 2006. Aujourd'hui, plus de 1000 boulons par mois sont utilisés dans les différents chantiers. Seuls 2 types sont utilisés couramment à Bou Azzer, le boulon à coquille et le boulon à friction Split Set, mais un troisième, le boulon à friction Swellex mérite notre attention.

2.3.1 Le boulon à coquille

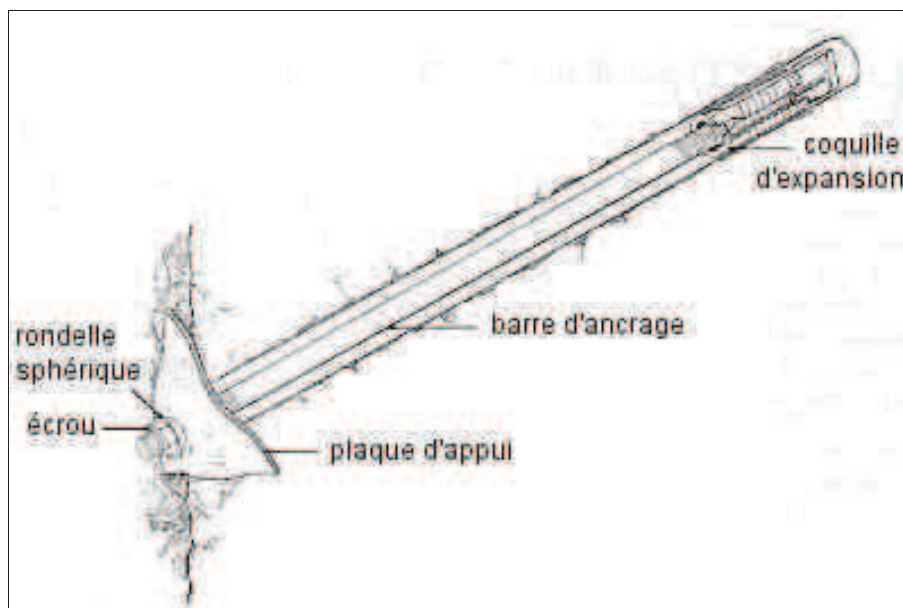


Figure 10: Schéma d'un boulon à coquille

Le boulon à coquille fait partie de ce qu'on appelle les boulons à ancrage ponctuel. Une tige est ancrée à son extrémité au fond d'un trou, et une plaque est serrée contre le terrain à l'autre extrémité. Ici, l'ancrage se réalise par une coquille d'expansion : lorsque l'on sert, on exerce un effort de traction sur la tige, la coquille s'écarte et vient en butée sur les parois du trou. Ceux utilisés à Bou Azzer ont des tiges en acier de 16 mm de diamètre et une longueur de 1,80 m. La tête d'ancrage à expansion comprend une noix d'expansion solidaire de la tige et une coquille qui s'écarte sous l'action de la noix. Ce boulon coûte 100 dh en comptant la plaque qui est indispensable. La figure 10 est un schéma de ce type de boulon.

2.3.2 Le boulon Split Set

Le boulon Split Set est un boulon à friction. Il se compose d'un tube d'acier à haute résistance fendu le long d'une génératrice. Le modèle utilisé à Bou Azzer a les caractéristiques géométriques suivantes :

- ✓ épaisseur du tube : 2,3 mm;
- ✓ diamètre extérieur : 38 mm à 39 mm;
- ✓ largeur de la fente : 18 mm.

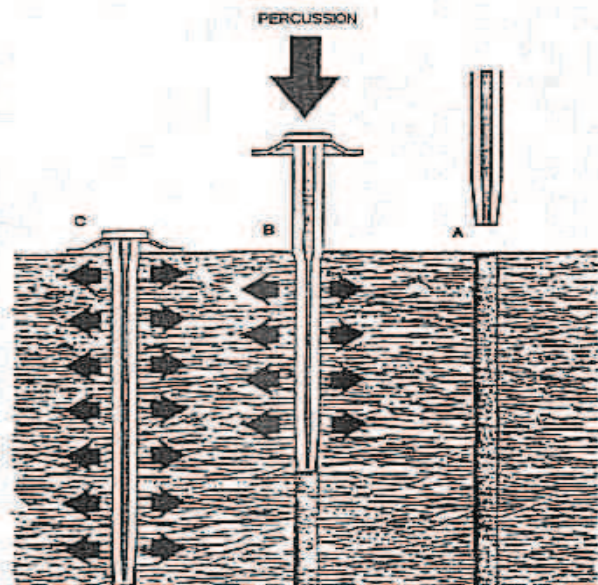
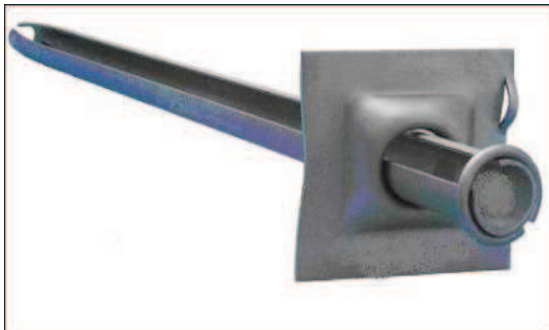


Figure 11: a) Photo d'un boulon Splitset b) Schéma de mise en place

L'extrémité que l'on introduit dans le trou est légèrement rétrécie. Il se met en place idéalement dans des trous de diamètre 36 mm au moyen d'un marteau perforateur. En l'introduisant, le diamètre du tube diminue par fermeture de la fente. L'acier restant dans le domaine élastique, le tube applique une pression sur les parois du trou. Ce

sont les forces de frottements entre la paroi et l'acier qui assurent l'ancrage du boulon. Plus de 90 % des boulons posés à Bou Azzer sont des boulons Split Set. Cette large prédominance de ce type de boulons est due à son faible coût (75 dh le boulon dont 30 dh de pose, pour celui de 1,80 m, seulement 68 dh pour le 1,50 m) et à la simplicité de sa mise en place. Les longueurs des boulons Split Set disponibles à Bou Azzer sont 1,50 m, 1,80 m et 2,10 m. Le boulon Split Set est sensible au diamètre du trou de forage, il perd donc beaucoup de sa capacité lorsqu'il y a le phénomène de surforation. La figure 11 présente le principe du boulon Split Set.

2.3.3 Le boulon Swellex

Le boulon Swellex est également un boulon à friction. Il se compose d'un tube initialement replié sur lui-même. Il possède les caractéristiques géométriques suivantes :

- ✓ le diamètre extérieur du tube avant pliage est de 41 mm;
- ✓ le diamètre du tube replié est de 27 mm;
- ✓ l'épaisseur de la paroi du tube est de 2 mm.

L'extrémité qui est introduite dans le trou est fermée. L'autre est munie d'un manchon que l'on connecte au moyen d'un flexible et d'un raccord à une pompe, ce qui permet d'injecter de l'eau sous pression à l'intérieur du tube. Sous cette pression, le tube se déplie pour venir épouser la forme du trou et se plaquer contre ses parois. Il se déforme plastiquement et reste plaqué contre les parois même après que la pompe a été déconnectée. Ce sont les forces de friction entre la roche et l'acier qui assurent l'ancrage du boulon. Le diamètre idéal du trou est de 38 mm.

Le boulon Swellex possède une meilleure efficacité que le Split Set. En effet, si le diamètre du trou, ou la forme, varie selon la longueur du trou, le Swellex s'adaptera et l'épousera complètement alors que le Split Set présentera des zones de non adhérence avec les parois. Toutefois, le Swellex reste plus cher que le Split Set, et sa mise en place est sujette à une bonne utilisation de la pompe qui s'avère être fragile, et à laquelle les opérateurs ne sont pas bien formés. Le principe du boulon Split Set est présenté sur la figure 12.

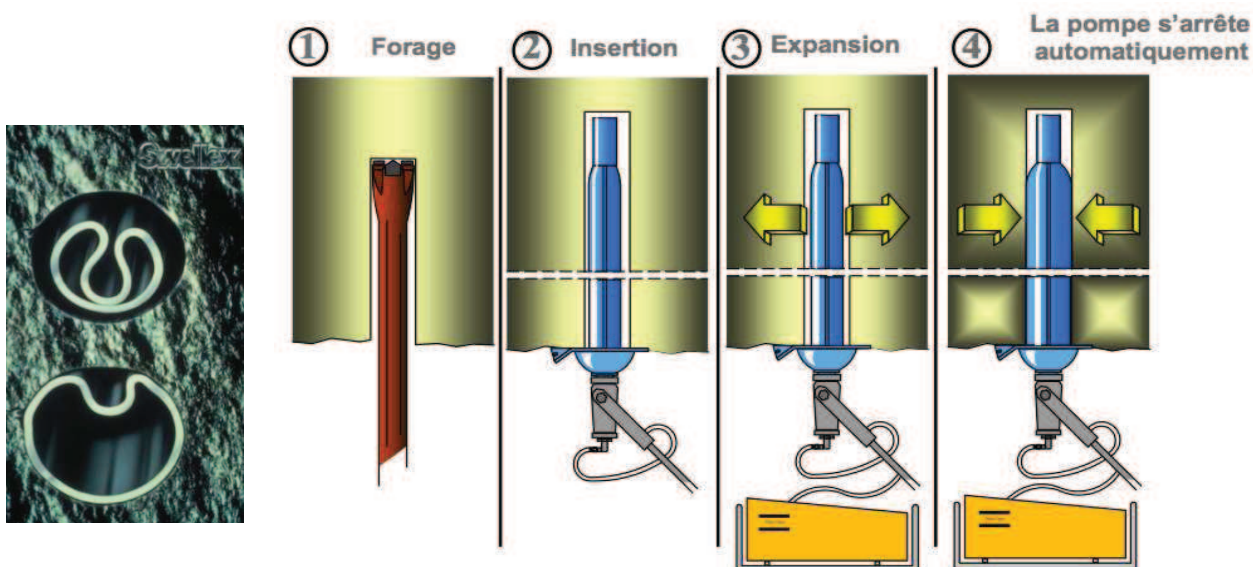


Figure 12: a) Sections du Swellex avant et après gonflement b) Séquence d'installation du boulon

2.4 Les grillages et treillis soudés

Ces grillages sont utilisés pour maintenir en place les blocs qui pourraient se détacher entre les boulons. Ils sont maintenus contre la paroi grâce aux boulons et à des plaques. Il existe deux types de grillages : le grillage Zigzag et le treillis soudé. Le grillage Zigzag est constitué de fils métalliques en zigzag. Il a l'avantage d'être très souple, de pouvoir se transporter et se manipuler aisément, et de pouvoir être appliqué facilement contre les parements ou la couronne et d'épouser des formes irrégulières. Le treillis soudé est constitué de deux familles orthogonales de fils soudés à leurs intersections. Ce treillis soudé est plus rigide que le grillage Zigzag et donc moins facile à manipuler et mettre en place. Cependant, il est moins cher, 17 dh/m² contre 60 dh/m² seulement pour le treillis Zigzag. La figure 13 montre ces deux grillages.

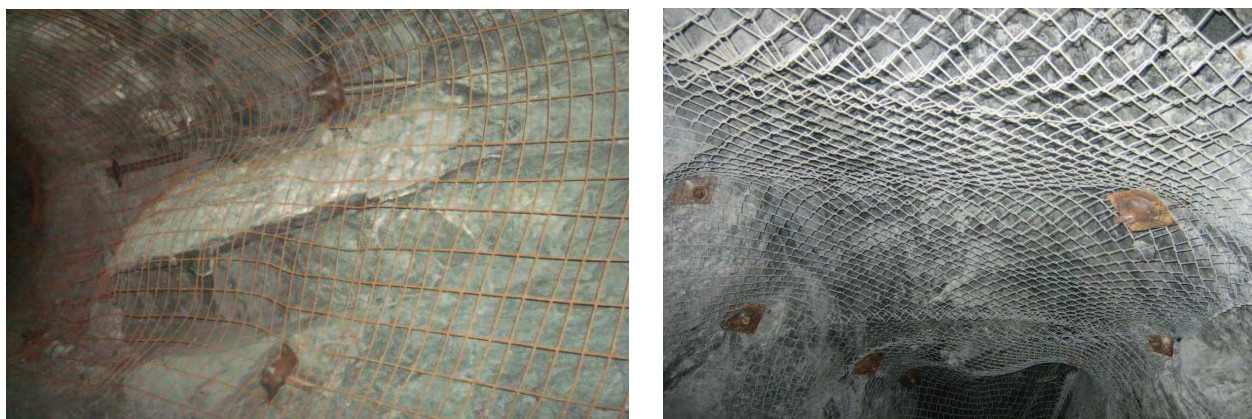


Figure 13: a) Treillis soudé b) Grillage Zigzag

3 Etude des situations « à problèmes »

La production de la mine à Bou Azzer est assurée par un ensemble de 36 tailles. La plupart de ces tailles sont exploitées aisément compte tenu du terrain mais dans certains cas, et pour diverses raisons, l'exploitation n'est pas du tout aussi simple. Ces tailles, considérées comme difficiles vis-à-vis de la tenue des terrains, sont appelées « tailles chocs » et sont affectées d'équipes dites « chocs » elles aussi. Dans cette partie, certaines de ces tailles difficiles, les plus problématiques, seront étudiées en détail dans le but soit d'améliorer leur productivité en évitant toute forme d'incident, soit de rendre possible l'exploitation pour le moment interrompue.

3.1 L'Axe Milon N250 de Bouismass

Le chantier de Bouismass se situe à 12 km vers l'Est de la zone administrative de Bou Azzer. C'est le site le plus productif actuellement puisqu'il produit à lui tout seul 25% de la production totale de Bou Azzer, soit 4220 ttv/mois à une teneur moyenne de 1,03%, soit environ 40 t_{métal}/mois. Ce chantier contient 3 structures filoniennes de contact, CM1, CM2 et CM3, et une structure intra-diorites appelée Axe Milon. Un puits permet de descendre jusqu'au niveau N380 où se trouve la salle de chargement, et un bure se trouve entre les niveaux N350 et N390 et donne l'accès à un niveau pas encore en exploitation. Les niveaux N40, N80, N120 et N200 ont été exploités par le passé et sont épuisés. Neuf tailles sont actuellement en exploitation dont les tailles Axe Milon des niveaux N250 et N300. La taille qui nous intéresse ici est l'Axe Milon du niveau N250 dans laquelle des problèmes et même des accidents ont été rencontrés.

3.1.1 Considérations géométriques

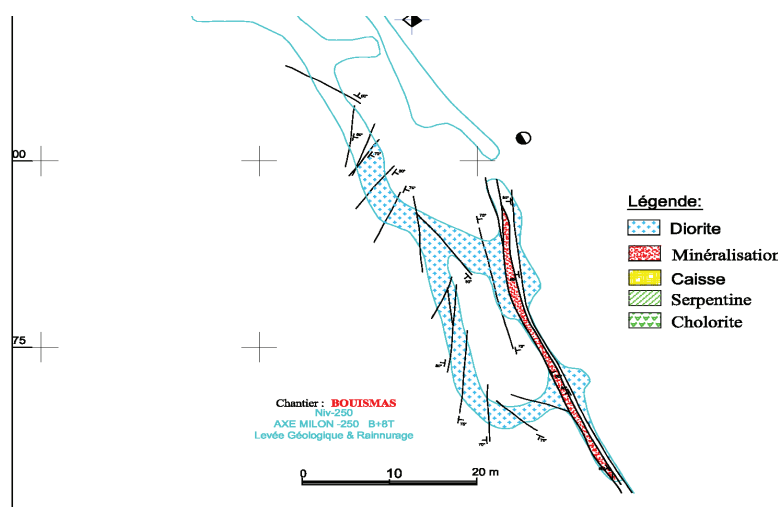


Figure 14: Levée géologique du niveau -250 à proximité de l'Axe Milon

La figure 15 est une coupe dans le plan horizontal du niveau N250 aux alentours de l'Axe Milon. Un premier accès à la structure a été tracé, puis elle a été exploitée sur une hauteur de 6 m. Des problèmes de tenue de terrains se sont présentés, ils seront détaillés plus longuement dans le paragraphe suivant. À l'extrémité sud de la structure minéralisée, il a été découvert qu'elle se prolongeait plus loin qu'on ne le pensait. Ayant déjà exploité la taille initiale sur 6 m de haut, il est impossible d'exploiter maintenant les six premiers mètres de cette extension de panneau. Il a donc été mis en place un deuxième accès sous forme de rampe 20 m au sud du premier accès. Le panneau en exploitation maintenant est donc un panneau de 14 m de haut avec une puissance moyenne de 1,20 m. Cela peut se voir sur la coupe longitudinale en figure 15.

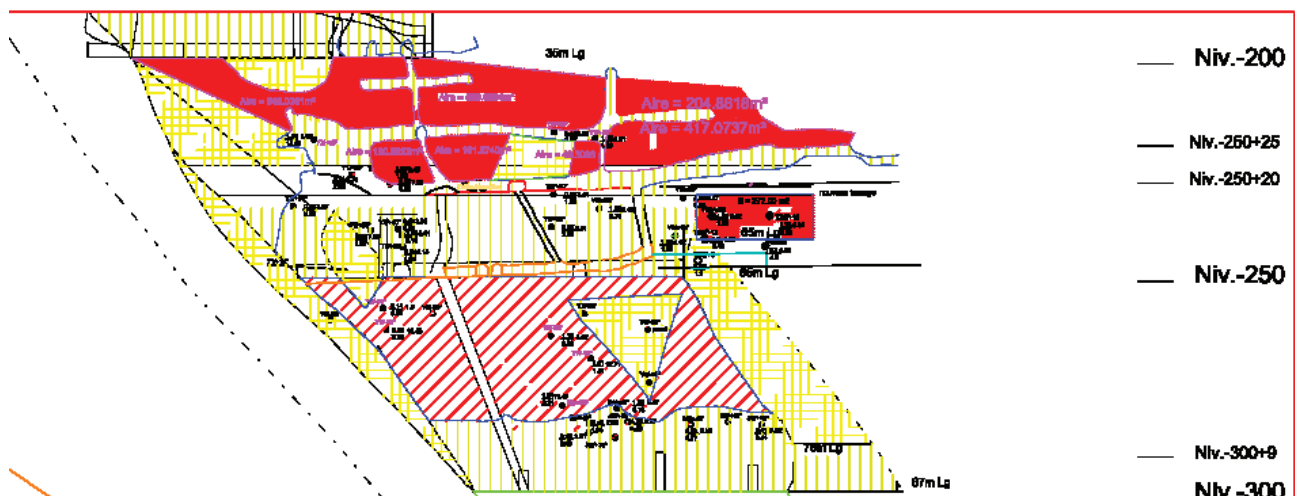


Figure 15: Coupe longitudinale de l'Axe Milon entre les niveaux -300 et -200

3.1.2 Considérations géomécaniques

La structure minéralisée est de teneur élevée, parfois supérieure à 5%, elle est donc très dense, pouvant atteindre une densité de 4. Le minerai est très fracturé, fortement bréchifié et contient de nombreux joints chloritisés. Le minerai comprend de 1 à 5 familles de joints différentes selon la position dans le filon. Ces familles possèdent des pendages supérieurs à 80°. La famille principale a pour orientation celle des épontes. Ces joints sont très nombreux, environ 5 cm en moyenne d'espacement entre 2 joints de la même famille, et ils sont à remplissage chloritisé. Les calculs d'indicateurs RMR et Q de N. Barton effectués pour ce minerai ont tous les deux qualifié ce minerai de « Terrain de très mauvaise tenue », un RMR de 27 et un Q de 0,012. Cette structure filonienne est intercalée entre deux épontes identiques. Ces deux épontes, composées de diorites peu voire pas fracturées, sont d'excellente tenue selon les indicateurs RMR et Q de N. Barton encore une fois, un RMR de 84 et un Q de 427. Cette diorite ayant une résistance à la compression simple supérieure à 150 MPa, ces épontes ne nous posent que très peu de problèmes. Il faut tenir compte de l'éventuelle présence de « faux murs », c'est à dire de joints chloritisés à peu près parallèles au filon situés à une quarantaine de centimètres

dans les épontes et qui menacent éventuellement de s'effondrer en plaque dans la taille. Remarquons toutefois qu'il n'y a plus de discontinuités de ce type à 1 m du contact. Ces « faux murs » sont détectables dans les infrastructures qui intersectent le filon, comme la galerie d'accès ou des niches. Il faudra y penser à l'heure de réfléchir au soutènement.

L'interface entre la structure minéralisée et chaque parement (qui est la génératrice de la famille principale de joints) est très lisse et chloritisée. Ce contact présente donc une très faible adhérence, et n'empêche pas du tout le glissement du minerai à cette interface. Cette taille est schématisée sur la figure 16.

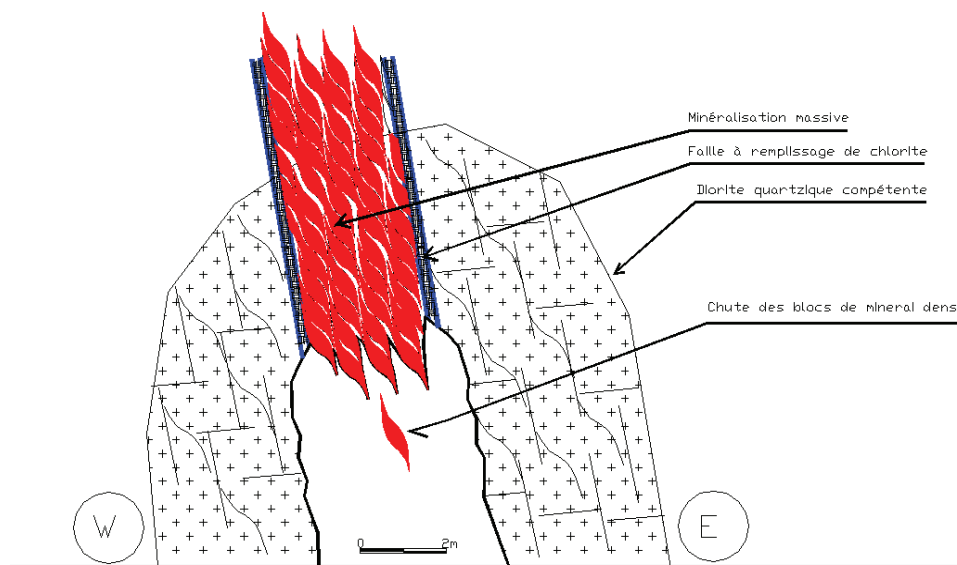


Figure 16: Schéma de coupe transversale d'une tranche de l'Axe Milon

3.1.3 Problèmes rencontrés et soutènement actuel

Les problèmes pouvant intervenir sont de deux ordres différents. Tout d'abord, il peut y avoir chute de fragments, plus ou moins petits blocs, de minerai sous l'effet de la gravité due aux nombreux joints chloritisés présents à l'intérieur même de ce minerai. Pour cela, il est actuellement utilisé du treillis soudé (panneau de 3 m x 6 m, de maille 50 mm x 100 mm, fils de 4,5 mm de diamètre) maintenu par des boulons Split Set de 1,80 m disposés dans les épontes résistantes de chaque côté. Leur installation est souvent conditionnée par la dimension de l'ouverture de la taille, et parfois ces boulons ne sont installés perpendiculairement à la surface. De temps en temps, ce boulon ne se trouve pas dans un carreau du treillis soudé, il ne le maintient alors pas du tout. Dans certains cas, un visible sur le chantier, deux treillis soudés ne se recouvrent pas, il y a un espace de près de 40 cm où le minerai est à nu. Enfin, il est possible de remarquer que quelques fils de ce treillis se sont dessoudés (dans certaines zones jusqu'à 5-6 soudures consécutives), soit au moment de la pause pour le faire épouser la forme de l'ouverture soit au moment de chute de blocs.

Ensuite, compte tenu de la très faible adhérence à l'interface minéral-parement, nous pouvons redouter la chute en tiroir d'un bloc beaucoup plus volumineux, de la taille de l'ouverture. Ce problème a causé 2 accidents mortels, un en 2004 et l'autre en 2006. En ce qui concerne le deuxième, le chute du bloc (environ 2 m de hauteur) est intervenue au niveau d'un rapprochement non négligeable des parements en montant, ce qui provoque ce qu'on appelle un « chapeau de gendarme » que plus rien ne retient. Un boulon Split Set de 1,80 m est utilisé à la verticale dans la couronne pour essayer de maintenir ce bloc en place. On remarque qu'il n'est pas toujours aisé et/ou sécuritaire de forer à la verticale pour y placer ce boulon, soit par manque d'espace soit par risque de chute de ce bloc pendant la foration et cela pénalise l'efficacité du boulon. Par exemple, posé à 45° il ne rentre que de 1,25 m ($1,8/\sqrt{2}$) dans le toit.

Le mode de soutènement utilisé pour le moment, présenté dans la figure 17, est le suivant : une rangée de 3 boulons Split Set tous les 1,30 m (un dans chaque parement, idéalement perpendiculaire au parement, un troisième dans la couronne) plaquant le treillis soudé le plus proche possible de la minéralisation. Ce soutènement est revu à des rangées de 5 boulons lorsque l'ingénieur responsable juge l'ouverture trop grande.

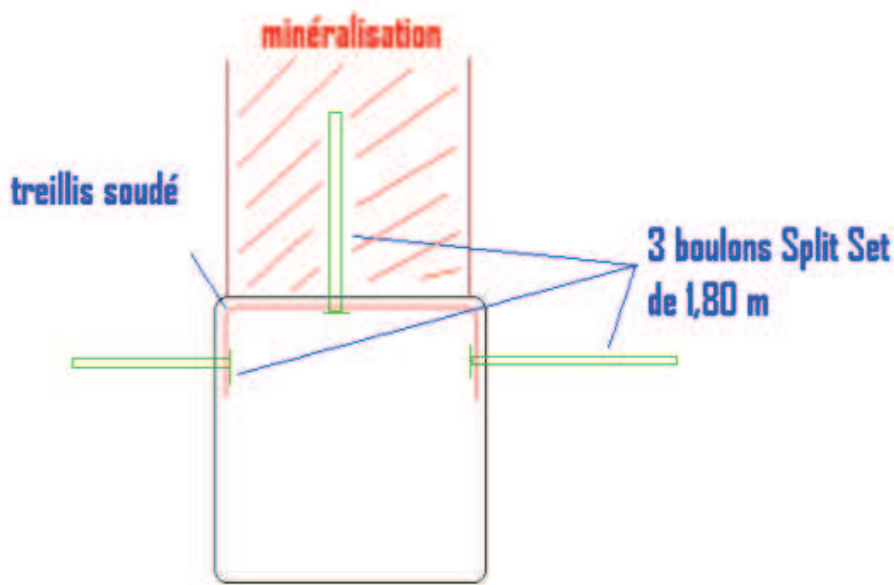


Figure 17: Schéma de soutènement actuel pour l'Axe Milon N250

3.1.4 Etude de ce soutènement

En cas de chutes de « petits » blocs, ce soutènement semble convenir, le treillis soudé retient très bien tous ces petits blocs, comme on peut le constater sur les deux photos présentées en figure 18, et le boulon Split Set est utile.

Maintenant, envisageons le cas d'une chute d'un bloc plus gros « en tiroir ». Le

rapport d'accident indique la chute d'un bloc de 2 m de hauteur, le boulon de 1,80 m posé n'intervient donc pas dans sa stabilité. Il faut maintenant étudier si le treillis peut supporter l'éventuelle chute de bloc en tiroir sur une grande hauteur dans le cas où les boulons ne suffiraient pas à le maintenir.

Ce treillis soudé peut supporter $X \text{ t/m}^2$. Au dessus de ce m^2 de treillis, supposons qu'un bloc de hauteur h soit susceptible de se détacher. La masse de ce bloc est donc $1 \times 1 \times h \times \mu = 4h$ tonnes. Ce treillis soudé pourra donc résister à la chute d'un bloc de hauteur $h = X/4$.



Figure 18: Photos montrant la retenue des petits blocs par le treillis soudé

Selon Jacques Fine, il est très courant, moyennant une pose et des soudures correctes, de pouvoir trouver un treillis soudé permettant une portance de 20 kN/m^2 . En attendant que des essais de rupture de treillis soudés soient effectués, j'utiliserai donc cette valeur. Ce treillis soudé, ainsi mis en place, peut donc soutenir un bloc de 50 cm de haut, pas suffisant si on sait que selon le rapport d'accident de 2006, un bloc de 2 m de haut s'est effondré. Toutefois, gardons en mémoire que le bloc de 2 m de haut est tombé lorsqu'il n'y avait pas encore de « cellule géotechnique », donc pas encore de soutènement, seuls des poussards en bois étaient utilisés. L'accident est survenu dans une zone qui n'avait pas été purgée et où la dimension de l'ouverture était particulièrement importante. Cependant, Jacques Fine dit aussi qu'un treillis soudé ne rompt pas violemment, sa rupture s'effectue progressivement, un fil va se dessouder par ici puis la charge va se reporter ailleurs et un autre fil va lâcher. Cela laisse le temps de voir venir, et de revoir le soutènement.

J'ai ensuite utilisé le logiciel Phase 2, un logiciel de modélisation à deux dimensions qui utilise le calcul par éléments finis. J'ai modélisé la structure par une colonne verticale de 14 m de haut et de puissance 1,40 m. L'ouverture est carrée, 2 m x 1,40m. La colonne de remblai de hauteur 6 m, sera modélisée de deux manières. La première consiste à la constituer de vide pour l'ordinateur alors que la seconde consiste à utiliser les données

fournies par Managem pour modéliser le remblai. J'ai décidé de ne pas utiliser seulement les informations de Managem, car à mon avis, fournir un module d'Young et une résistance à la compression pour un remblai me semble très ambitieux... Dans les deux cas, on observe le « strength factor » qui représente le rapport de la contrainte admissible par la contrainte principale. On remarque que les instabilités se concentrent aux niveaux des parements et de la couronne. Le strength factor nous suggère que la hauteur du bloc instable est d'environ 70 cm pour le cas où la zone remblayée est « vide », et 60 cm avec des caractéristiques de type « remblai ». Le boulon Split Set placé à la verticale dans le minerai dépassera la zone instable de plus d'1 m, il ne sera pas totalement inutile et peut aider le treillis et les autres boulons à soutenir ce bloc instable.

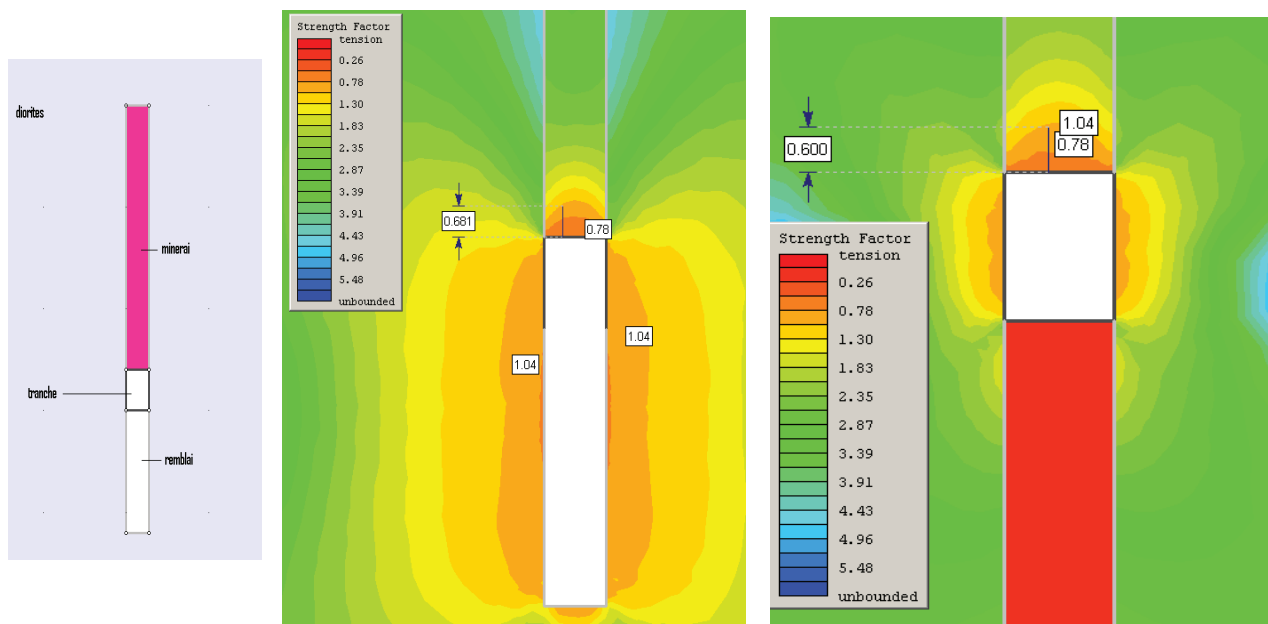


Figure 19: Simulation de l'Axe Milon
a) modélisation effectuée b) résultat "sans remblai" c) résultat "avec remblai"

3.1.5 Solutions préconisées

Le schéma de boulonnage me paraît correct, je préconiserais tout de même de systématiser des rangées de 5 boulons tous les 1,30 m. Par rangée, 3 boulons doivent être utilisés dans la couronne, des Split Set de 1,80 m, afin de freiner tant que possible la chute de blocs en « tiroir ».

Posons-nous la question de savoir si les boulons de la couronne permettent de soutenir le bloc « en tiroir » de h mètres par exemple. Ce bloc pèse $1,3 \times 1,4 \times h \times 4 = 7,3h$ t. Supposons que les boulons ne sont porteurs que sur leur partie ancrée dans les épontes, la moitié du boulon, 90 cm. Ces boulons portent en traction 60 kN/m au minimum d'après les essais d'arrachement effectués (un boulon de 1,80 m résiste à 12 t). Ils sont donc

capables à eux deux (un de chaque côté) de supporter $60 \times 0,9 \times 2 = 108$ kN soit 11 t ce qui correspond à un bloc de 1,50 m de haut. Si l'on se fie à la simulation qui suggère un bloc instable de 70 cm, cela suffit, d'autant plus que le boulon central dépassera de cette zone instable d'un bon mètre.

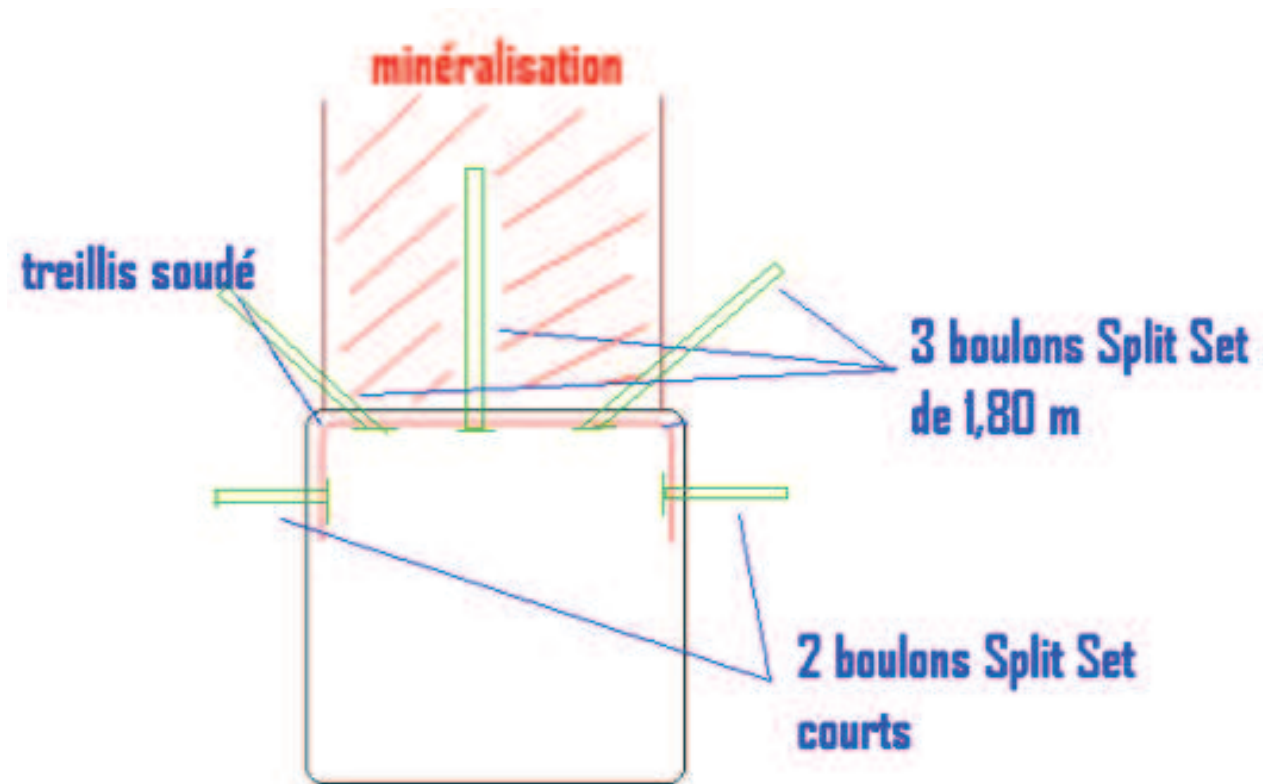


Figure 20: Schéma de soutènement proposé pour l'Axe Milon N250

Il me semble judicieux de boulonner systématiquement les parements avec un boulon de chaque côté afin d'empêcher l'effondrement des « faux murs » mentionnés plus haut. Des boulons courts de 1 m suffisent et permettront une meilleure installation, qui n'est pas toujours acquise compte tenu de l'espace disponible. Dans tous les cas d'installation, je propose d'utiliser des fleurets usagers afin de maximiser l'efficacité des boulons Split Set. Une campagne d'essai pourrait être menée pour caractériser ce gain d'efficacité en fonction du type de roche.

Le grillage ou treillis soudé est bien entendu indispensable étant donné la friabilité du minerai. Cependant, il faut bien insister sur la qualité du treillis. Le treillis joue un rôle de confinement de par sa raideur. Il faut donc tester ce treillis et chiffrer la résistance des soudures. Si cette dernière ne pouvait être assurée, il faudrait envisager d'utiliser le grillage zigzag, certes plus cher mais bien plus facile à installer puisqu'il est plus flexible que le treillis soudé. De plus, son efficacité est moins sujette aux défauts de fabrication car il ne contient pas de soudure. Finalement, contrairement au treillis soudé, le grillage épouse parfaitement la forme de l'ouverture. La figure 20 présente ce soutènement.

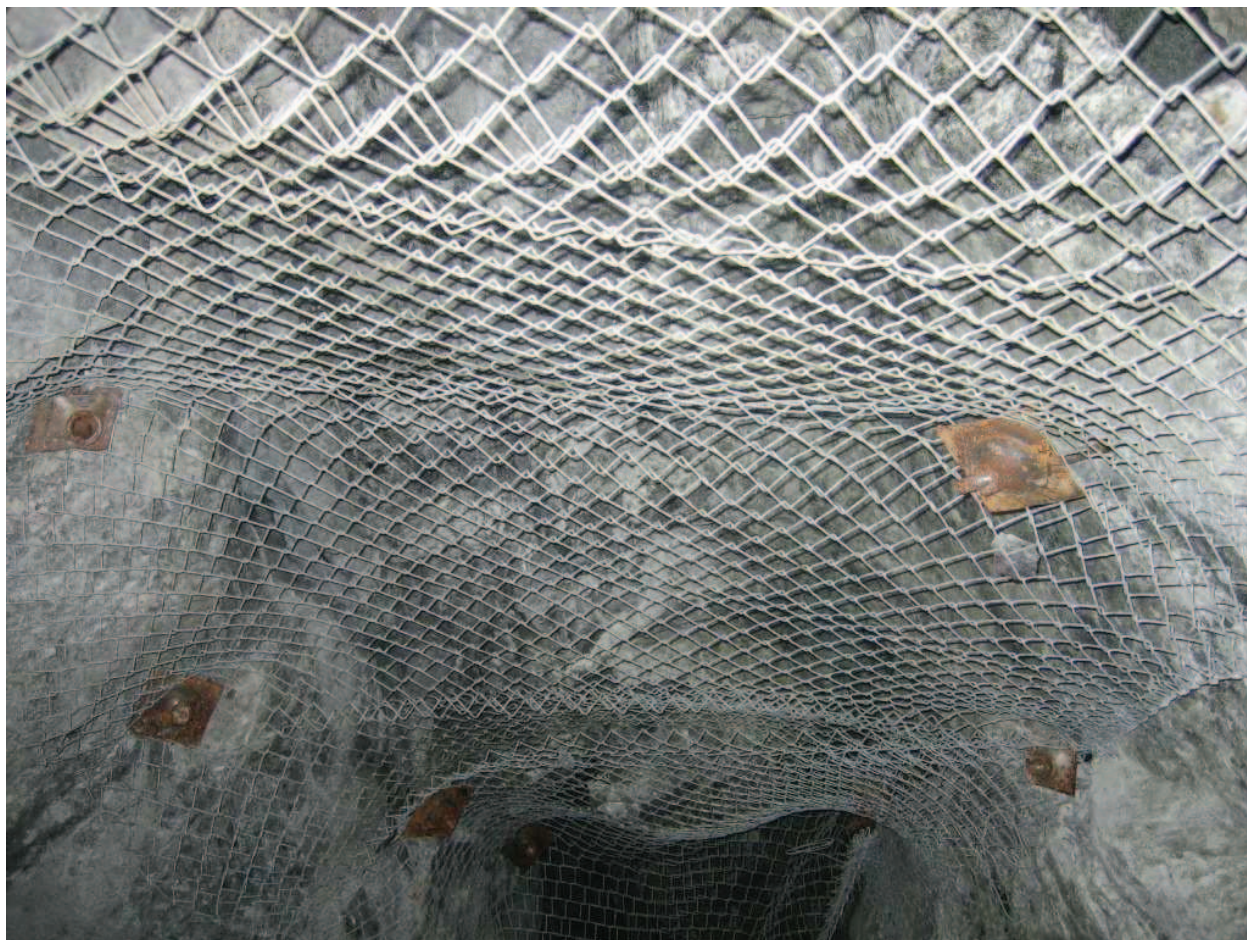


Figure 21: Grillage Zigzag épousant parfaitement la forme de la couronne

Cette systématisation du soutènement, et plus de soin et de rigueur dans sa mise en place éviteraient beaucoup d'éboulements. Toutefois, il faut aussi imaginer qu'on peut s'adapter au terrain d'une tranche à l'autre. En effet, un mineur averti peut tout à fait observer les variations d'inclinaisons de parements. Il peut remarquer par exemple, que les parements semblent se rapprocher et anticiper que cela peut être très défavorable si un « chapeau de gendarme » venait à se former, favorisant la chute d'un bloc entier. Ou au contraire, remarquer que à la tranche suivante, nous serons dans une situation tout à fait favorable et qui a priori ne nous posera pas trop de problèmes. Dans le cas du « chapeau de gendarme », en fonction de sa taille, il pourrait être très intéressant de tirer entièrement ce bloc afin d'éviter tout risque ou de soutenir par des cadres en bois dans cette zone sensible.

Sinon, dans le cas où on souhaiterait envisager une autre méthode, il semblerait qu'une méthode descendante soit plus appropriée. En effet, la très mauvaise qualité du minerai nous suggère de travailler avec le minerai sous les pieds plutôt qu'au dessus de la tête. De plus, la très bonne tenue des parements nous permettrait d'envisager de pouvoir ouvrir sur de grandes hauteurs et de gagner ainsi en productivité. Il ne faudrait bien entendu pas s'affranchir de soutenir les parements, toujours à cause de ces « faux murs », mais nous n'aurions plus à soutenir la couronne si nous travaillions sous dalle ou

sous remblai cimenté. Il faudrait également réfléchir aux problèmes logistiques, de type descente de scoop, ou position de cheminée à minerai... Des plans ont été travaillés à la main, et pourront éventuellement être approfondis. Toutefois, Managem préfère rester sur la méthode des Tranches Montantes Remblayées qu'ils maîtrisent bien.

3.1.6 Coût de ce soutènement

Je vais dans cette partie calculer le coût de ce soutènement, boulonnage grillage, et le comparer au coût de l'ancien. Le tonnage abattu est le même dans les deux cas, il tient compte de la dilution. Le tonnage déblayé est le tonnage abattu plus le salissage. L'abattage stérile correspond au déflinquage nécessaire au remblayage et à l'abattage pour la cheminée à minerai et les passages personnel. La figure 22 présente la feuille de calcul qui m'a permis de calculer les charges puis le « cash-cost » d'une livre de cobalt dans le cas de l'ancien soutènement. En annexe, se trouve les deux feuilles de calcul, ancien et nouveau schéma de soutènement, à la suite. Les chiffres importants sont les suivants :

- le coût du soutènement pour une tranche passe de 8 706 dh à 12 891 dh lorsqu'on ajoute les deux boulons Split Set de 1,50 m dans les parements ;
- cela se traduit par une augmentation des charges de 52 312 dh pour le panneau ;
- et une augmentation de 0,11 \$/lb de cobalt.

Cependant, on évite ainsi les accidents, et donc les temps d'immobilisation du chantier. Ce calcul est pessimiste, puisqu'il chiffre les surcoûts sans chiffrer les gains espérés.

Charges Fonds			
	Q	Prix de revient	Charges
Abattage (T)	3 410,40	144,00	491 097,60
Déblayage (T)	3 528,00	19,00	67 032,00
Remblayage (T)	1 666,00	19,00	31 654,00
Abattage stérile (m3)	455,00	250,00	113 750,00
Soutènement (tranches)	12,50	8 706,00	108 825,00
Roulage (T)	3 528,00	1,50	5 292,00
Extraction (T)	3 528,00	16,00	56 448,00
Transports (T)	3 528,00	12,00	42 336,00
Service commun	3 528,00	5,38	18 980,64
Frais Généraux	3 528,00	12,00	42 336,00
Ensemble Frais Généraux	3 528,00	17,00	59 976,00
			1 037 727,24
Charges Usine Bou Azzer (laverie)			
	Q	Prix de revient	Charges
	3 528,00	105,00	370 440,00
Charges Usine Marrakech (hydro)			
	Q	Prix de revient (/kg)	Charges
	25,46	84,00	2 138 476,03
			3 546 643,27
Charges Totales			
Parité (dh/\$)	8,20	Cours bourse (\$/lb)	23,50
Cash-Cost (\$/lb)	7,70		
Conversion	0,45	Gain \$/lb	15,80

Figure 22: Feuille de calcul des charges pour l'ancien schéma de soutènement

3.2 Le Croiseur 2 N325 d'Aghbar

Le chantier d'Aghbar se situe 10 km à l'Est de la zone administrative de Bou Azzer. C'est un chantier important de Bou Azzer puisqu'il représente près de 20 % de la production totale, soit 2036 ttv/mois à une teneur moyenne de 1,16%, soit environ 20 t_{métal}/mois. Les niveaux déjà épuisés sont les niveaux N45, N85, N125 et N165. Les niveaux N205, N245, N285, N325 et N365 sont actuellement en exploitation. La structure qui nous intéresse ici est le Croiseur 2 et en particulier le chantier du niveau N325. Pour se rendre dans ce chantier, il faut descendre par un puits jusqu'au niveau N125, puis parcourir près de 500 m de galeries pour rejoindre le bure qui va nous permettre d'accéder aux niveaux avals. Ces 500 m de galeries sont en pleine serpentine, une bonne partie est soutenue par une grosse densité de cadres en bois (< 1 m) et un garnissage boisé également.

3.2.1 Considérations géométriques

Au niveau N325, la minéralisation du Croiseur 2 était probable, comme indiqué par les géologues sur la coupe longitudinale présentée en figure 23. Cependant, la structure n'était minéralisée que à partir de 8 m plus haut. Elle a donc été tracée, à cette cote là, sur une longueur de 40 m dont 30 m sont minéralisés. La puissance varie de 80 cm à 2 m dans le filon. Le panneau mesure donc 28 m de haut, et plus on monte, plus l'extension du panneau diminue, pour atteindre 20 m en haut. L'extension de la minéralisation varie avec la hauteur et les sondages actuels ne sont pas capables de nous l'indiquer. La structure possède un pendage d'environ 75°. Le chantier est actuellement en arrêt à cause de problèmes de terrains qui seront détaillés dans les paragraphes suivants.

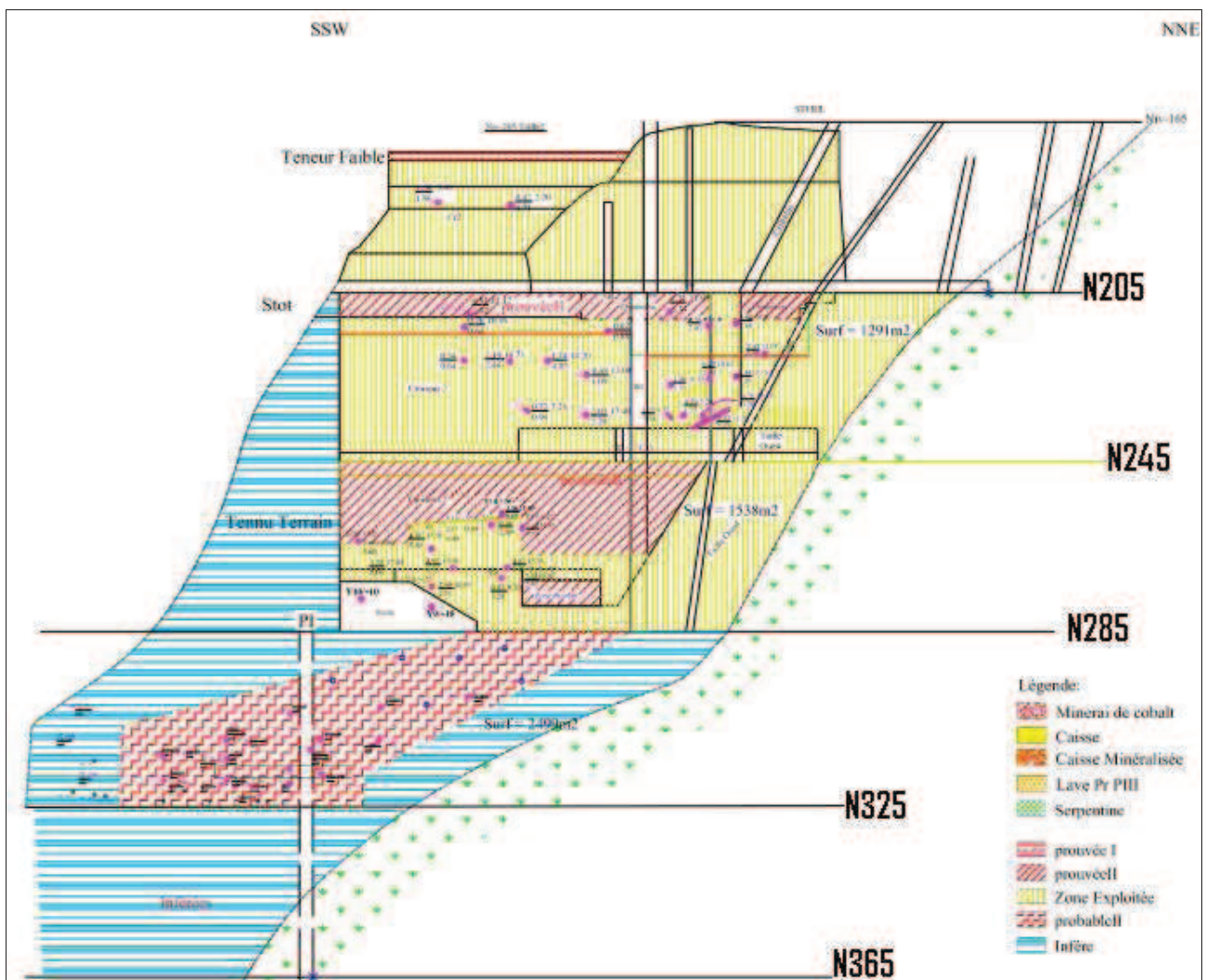


Figure 23: Coupe longitudinale du Croiseur 2 d'Aghbar entre les niveaux N165 et N365

3.2.2 Considérations géomécaniques et difficultés rencontrées

La teneur de la structure minéralisée est d'environ 1,2 % en moyenne et sa densité est à peu près de 2,8. Le minerai est très fracturé, avec une résistance à la compression simple inférieure à 15 MPa et un RQD de l'ordre de 15-20 %. On ne remarque pas de famille de fissures particulière, le minerai est sans cohésion. Les indicateurs RMR et Q de N. Barton calculés et détaillés plus haut qualifient le terrain « de très mauvaise tenue » (RMR=31 et Q=0,02).

Cette structure se situe entre deux épontes constituées de rhyolites altérées. L'altération de ces rhyolites, tout comme la présence de la minéralisation, provient de l'apparition d'une faille, la faille d'Aghbar, à proximité. Ces rhyolites altérées sont de très mauvaise tenue selon les indicateurs RMR et Q (respectivement 31 et 0,02). Il y a de nombreux joints ouverts, l'ouverture étant parfois supérieure à 5 mm, et à remplissages tendres, chloritisés.

Notons que les épontes de rhyolites altérées ont des épaisseurs de 5 m et 10 m de part d'autre de la minéralisation. Plus loin, le milieu est constitué de rhyolites « saines », ou tout au moins beaucoup moins altérées. Le massif de rhyolites moins altérées s'éloigne lorsqu'on remonte dans le filon. Cette description est visible sur le schéma présenté en figure 24 :

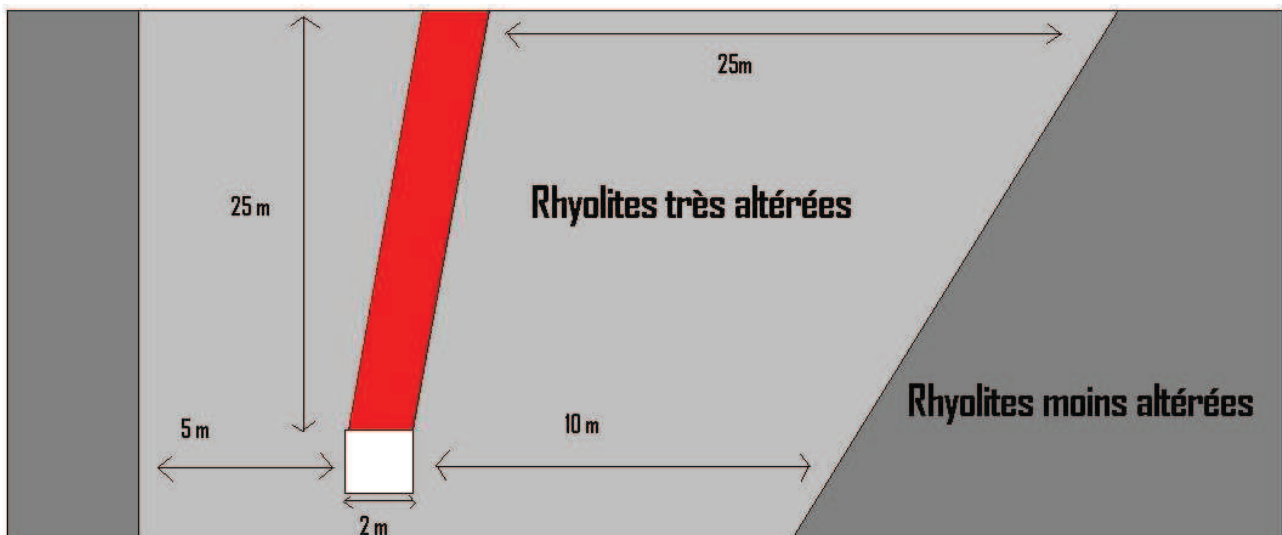


Figure 24: Schéma de coupe transversale du Croiseur 2 d'Aghbar au niveau N325

Notons également que la taille équivalente du niveau supérieur (N285) a été exploitée avec de nombreuses difficultés dues aux instabilités des terrains. Ce sont les

mêmes problèmes qui ont rendu le traçage de la structure. Le soutènement préconisé durant l'avancée du traçage était le suivant : des cadres en bois espacés de 1 m et dont les montants et le chapeau étaient de diamètre 18 cm comme indiqué dans le schéma qui m'a été fourni et qui se trouve en figure 25.

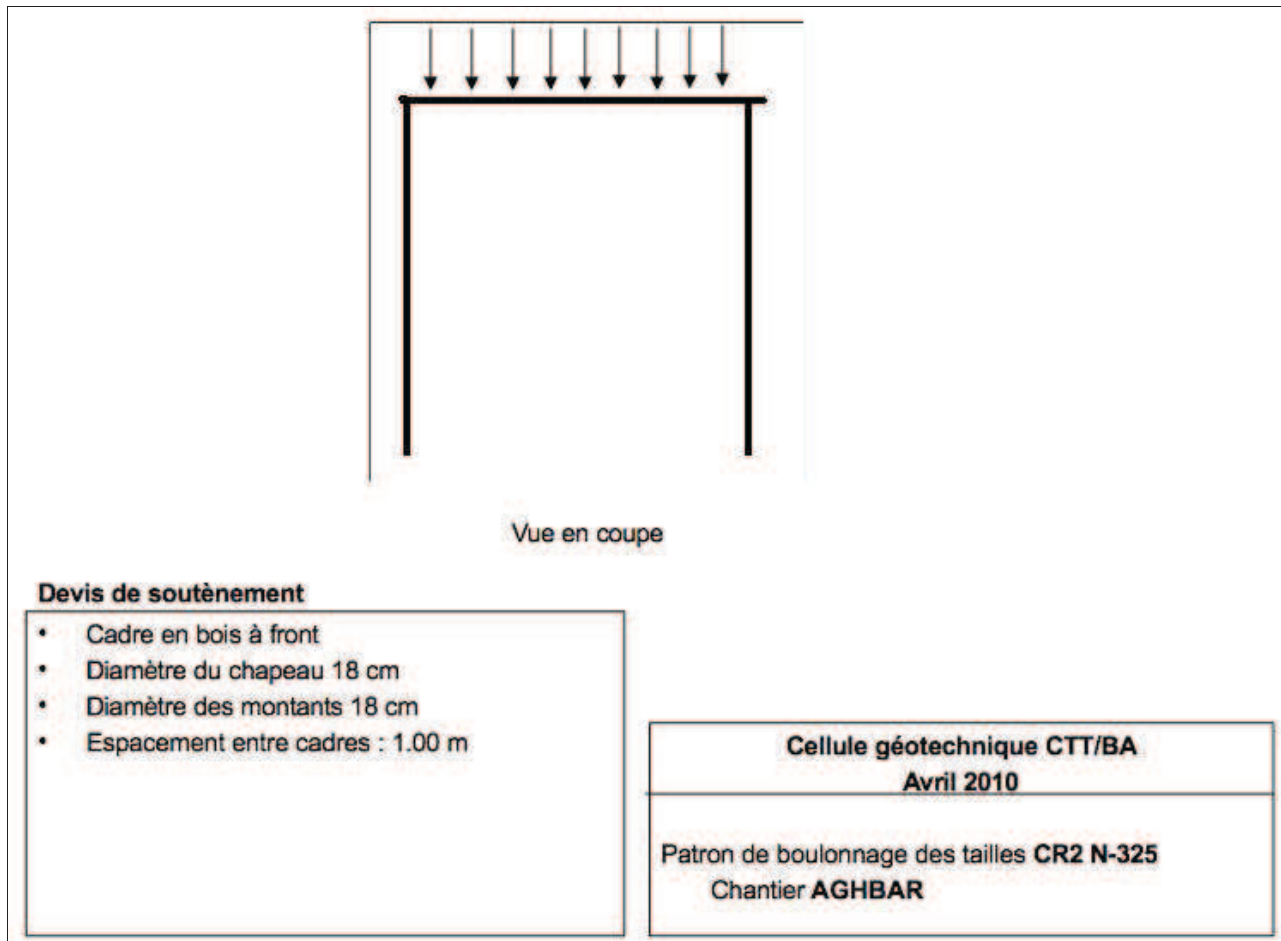


Figure 25: Schéma de soutènement prévu pour le traçage du Croiseur 2 d'Aghbar au niveau N325

Cependant, il n'a pas été possible de respecter ce soutènement. Le minerai et les parements s'effritaient immédiatement. Les opérateurs ont été confrontés à des éboulements à plusieurs endroits dans la structure. Le soutènement mis en place a donc plus relevé de l'adaptation sur le terrain que du suivi d'une procédure. Par exemple, au début du traçage, un éboulement a formé une ouverture de 3 m à 4 m de large et de 4 m à 5 m de haut. Le soutènement qui a alors été mis en place est constitué de cadres en bois (ou plutôt de chapeaux en bois posés sur une pile de bois de part et d'autres) associés à un garnissage boisé. Ensuite dans la zone où l'ouverture et la hauteur ne dépassent pas respectivement 1,50 m et 2 m, des boulons Split Set ont été mis en place avec du grillage Zigzag. Il n'y a pas de règle pour le boulonnage, il est anarchique, on s'adapte comme on peut, c'est très difficile. Plus loin dans la taille, un éboulement de gros blocs a eu lieu, il a dû être rapidement mis en place une pile fixe de bois.

Il n'est clairement pas possible de continuer comme ça et d'envisager de passer à la

tranche supérieure avec un tel mode de soutènement.

3.2.3 Solutions préconisées

Notons tout d'abord que ces rhyolites altérées ont une résistance à la compression aux alentours de 8-9 MPa, et que à cette profondeur, la contrainte naturelle verticale est déjà de $0,0027 \times 9,81 \times 300 = 8$ MPa et que les contraintes horizontales sont en général plus élevées que la verticale. Selon J. Fine, on peut qualifier ce terrain de « très sollicité » dans le sens où « la résistance à la compression simple est inférieure au double de la contrainte verticale naturelle. Dans ce terrain, les éboulements résultent à la fois de la rupture de la roche par excès de compression et du cisaillement des fissures naturelles. Si on retire les éboulis, l'effondrement se propage. Il faut donc mettre en place un soutènement confinant.

Deux solutions s'offrent à nous : des cadres en bois ou du boulonnage-grillage avec du béton projeté. Dans les deux cas, il nous faut tout d'abord calculer la dimension de l'anneau plastique qui se forme si on suppose que la roche a un comportement élastoplastique avec critère de Coulomb. Ce rayon est donné par la formule suivante, selon G. Vouille de l'Ecole des Mines de Paris :

$$b = a \left[\frac{2}{(K+1)(1-\eta)} \right]^{\frac{1}{K-1}}$$

- où - C est la cohésion résiduelle de la roche
- φ l'angle de frottement résiduel
- a le rayon de la galerie
- b le rayon de la voûte plastique

$$K = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$$

et avec

$$\eta = \frac{\sigma_v}{\sigma_v + C \cot(\varphi)}$$

Pour une ouverture de $2 \times 2 \text{ m}^2$, dans la rhyolite altérée, cet anneau plastique a un rayon de 1,70 m, soit une épaisseur dans la roche de 70 cm. Les simulations effectuées sur Phase2 fournissent le même ordre de grandeur de la zone instable, environ 65 cm.

3.2.3.1 Cadres en bois

Dimensionnons alors le soutènement par cadres en bois. Commençons par le chapeau qui peut être assimilé à une poutre de section circulaire sur 2 appuis ponctuels (les montants) chargée de manière homogène par le poids de la zone plastique située au-dessus d'elle. La figure 26 détaille la modélisation adoptée :

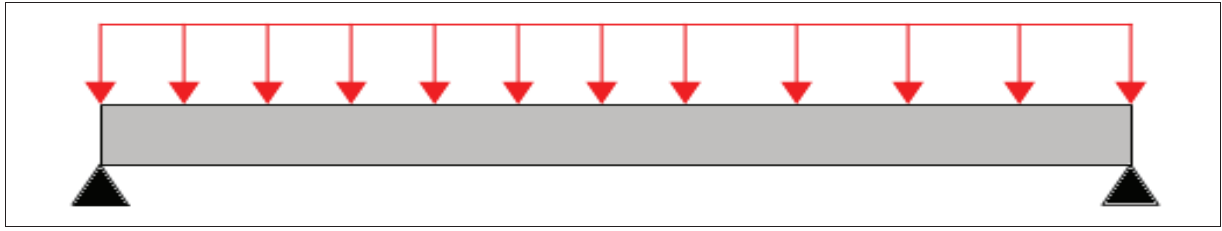


Figure 26: Modélisation du chapeau d'un cadre en bois

Le chapeau, de diamètre d , va donc travailler en flexion, et c'est la résistance à la traction qui va être limitante. La contrainte de traction sera maximale dans la partie basse de la poutre en flexion. Notons F (N/m) la force linéique à laquelle est soumis le chapeau, elle correspond au poids de la zone plastique que supporte un cadre répartie sur la longueur L du chapeau. Notons e l'espacement entre deux cadres, h la hauteur du bloc plastique, ρ la masse volumique.

Le moment de flexion est maximal au milieu de la poutre et donné par la relation suivante :

$$M_{f,max} = F \frac{L^2}{8}$$

Et la contrainte de traction maximale se situe à l'extrémité basse de la poutre, pour une valeur de y égale à $d/2$:

$$\sigma_{T,max} = \frac{M_{f,max} d}{2I_z} \quad \text{Où} \quad I_z = \frac{\pi d^4}{64}$$

Le critère retenue pour assurer la stabilité du cadre en bois est que la contrainte de traction $\sigma_{T,max}$ ne doit pas dépasser la moitié de la résistance à la traction théorique du bois R_T qui est d'environ 80 MPa pour les bois utilisés à Bou Azzer. Ceci étant dit, je vais jouer sur le diamètre d du bois et l'espacement e entre deux cadres pour assurer la stabilité et minimiser le coût. La masse volumique du bois est de 830 kg/m³ et il en coûte 1 300 dh/t soit 1 079 dh/m³.

Le diamètre standard des montants est de 18 cm, en ce qui concerne le chapeau, il peut être de 16, 18, 20, 22, 24 cm avec une préférence pour les plus petits diamètres, sinon le bois devient trop lourd et difficile à manipuler. Pour une tranche de longueur de 30 m, il faut $n = E(L/e)$ cadres en bois, où $E()$ est la partie entière. Il faut donc $2n$ montants et n chapeaux, sans oublier le garnissage mais qui est constant quelles que soient les diamètre et espacement des cadres. Toutefois l'espacement ne doit pas dépasser 2 m car cela devient ensuite très difficile de mettre en place le garnissage boisé. Le sous-traitant prend 541,56 dh pour la pose d'un cadre quel qu'il soit. La figure 27 détaille le calcul.

Diamètre (cm)	16,00	18,00	20,00	22,00	24,00
Espacement (m)	1,70	2,00	2,00	2,00	2,00
Coût des cadres pour une tranche (dh)	2 702,50	2 469,90	2 663,00	2 876,50	3 110,20
Coût des cadres posés pour une tranche (dh)	12 259,42	10 593,30	10 786,42	10 999,86	11 233,64

Figure 27: Tableau récapitulatif du coût du soutènement par cadres en bois d'une tranche du Croiseur 2 en fonction du diamètre du chapeau et de l'espacement associé

La solution retenue est donc celle de cadres dont le chapeau et les montants sont des bois de 2 m de long et de 18 cm de diamètre. Le garnissage sera constitué de bois de longueur 2,50 m et de diamètre 10 cm disposés tout autour de la galerie.

Le principe est donc le suivant. Tout d'abord, on remblaie la taille en laissant seulement 80 cm de haut sous le minerai. On prend également soin d'avoir abattu le minerai sur une petite zone afin de pouvoir abattre le reste en gradin. On retire le chapeau des cadres de la tranche inférieure au fur et à mesure que l'on avance dans le traçage de la tranche supérieure tout en mettant en place le soutènement de cette tranche. Le soutènement devient lourd et très cher mais il n'y a pas le choix compte tenu de la faiblesse des terrains. Cela reste toujours rentable et chaque livre de cobalt sortant de l'usine a coûté 0,77 \$ en soutènement, comme il est visible sur la figure 28.

Charges Fonds			
	Q	Prix de revient	Charges
Abattage (T)	3 546,82	144,00	510 741,50
Déblayage (T)	3 669,12	19,00	69 713,28
Remblayage (T)	1 759,50	19,00	33 430,50
Abattage stérile (m3)	455,00	250,00	113 750,00
Soutènement (tranches)	14,00	25 839,57	361 753,92
Roulage (T)	3 669,12	1,50	5 503,68
Extraction (T)	3 669,12	16,00	58 705,92
Transports (T)	3 669,12	12,00	44 029,44
Service commun	3 669,12	5,38	19 739,87
Frais Généraux	3 669,12	12,00	44 029,44
Ensemble Frais Généraux	3 669,12	17,00	62 375,04
			1 323 772,59
Charges Usine Bou Azzer (laverie)			
	Q	Prix de revient	Charges
	3 669,12	105,00	385 257,60
Charges Usine Marrakech (hydro)			
	Q	Prix de revient (/kg)	Charges
	26,48	84,00	2 224 015,07
Charges Totales			3 933 045,26
Parité (dh/\$)	8,20	Cours bourse (\$/lb)	23,50
Cash-Cost (\$/lb)	8,21		
Conversion	0,45	Gain \$/lb	15,29

Figure 28: Feuille de calcul du coût de la rentabilité du soutènement boisé du Croiseur 2 d'Aghbar

3.2.3.2 Boulonnage et béton projeté

Pour dimensionner ce soutènement, reprenons la valeur de $h=70$ cm autour de la galerie pour la dimension de la zone à soutenir. Les boulons utilisés seront des boulons Split Set de 1,80 m. Notons a le coté de la maille carré de boulonnage. Notons e l'épaisseur de la couche de béton projeté. Une maille de boulonnage supporte donc un volume $a^2 \times h$ de terrain. Alors la force linéique $F(N/m)$ s'appliquant sur cette « dalle » de coté a s'exprime de la façon suivante :

$$F = \rho a h g$$

La dalle en béton rompra par traction au niveau des fibres inférieures. Le moment

de flexion est maximal au milieu de la dalle et donné par la relation suivante :

$$M_{flexion, max} = F \frac{a^2}{8}$$

Et la contrainte de traction maximale est subie par la fibre inférieure de la dalle, pour une valeur de y égale à $e/2$:

$$\sigma_{T, max} = \frac{M_{flexion, max} \times e}{2I_z} \quad \text{Où} \quad I_z = \frac{a e^3}{12}$$

La résistance à la traction simple R_T des bétons utilisés à Bou Azzer est à peu près de 1,5 MPa. Je prends 1,5 comme coefficient de sécurité, ce qui signifie que $\sigma_{T, max}$ ne doit pas dépasser 67 % de R_T . La solution optimale semble être celle qui utilise une maille de boulonnage de 1 m et une épaisseur de 15 cm de béton projeté. Je vais maintenant calculer le coût de ce soutènement pour une tranche et le comparer aux 23 840 dh du soutènement par cadres en bois. Sur les 40 m de la taille, il faudra, pour chaque mètre, quatre boulons Split Set (2 dans la couronnes espacés d'1 m, puis un dans chaque parement au milieu de la hauteur) soit $4 \times 40 = 160$ boulons d'1,80 m et autant de trous. À 45 dh le boulon avec sa plaque, 27 dh la pose d'un boulon par le sous-traitant, et 5 dh le mètre foré, cela donne le coût du boulonnage de la tranche : $160 \times (45 + 27 + 5 \times 1,80) = 12\,960$ dh. Il reste à calculer le coût de la projection de béton sur le toit et les parements de la tranche. Le sous-traitant prend 528,04 dh pour projeter une épaisseur 15 cm de béton sur un mètre de galerie. Pour la taille de 40 m, cela coûte 21 121,50 dh. Additionné au coût des boulon, cela donne déjà 34 081,50 dh sans compter le prix du béton lui-même (donnée que je n'ai pas obtenue). Cette solution est donc beaucoup moins rentable que le soutènement par cadres en bois.

Toutefois, on doit pouvoir diminuer l'épaisseur du béton projeté si l'on ajoute du treillis soudé à l'intérieur. Cela doit pouvoir diminuer le coût.

3.3 La Structure CM N260 de Bou Azzer Est (Puits V)

Le chantier de Bou Azzer Est se situe à près d'1 km de la zone administrative de Bou Azzer. Il représente 1644 t/mois à une teneur moyenne de 1,12%, soit environ 15,5 t_{métal}/mois. Il comprend trois puits nommés I, V et VI. Le puits V n'est actuellement pas exploité, mais les niveaux N45, N95, N137 et N160 l'ont été par le passé. Managem s'est attaqué au niveau N260, mais a arrêté l'exploitation suite à des éboulements notamment sur le niveau inférieur. En sortant du puits, creusé dans la diorite saine, pour se rendre à la taille, il faut traverser un massif de serpentine franche soutenu par des cintres disposés tous les 1 m avec un garnissage boisé. A cause de la faible ouverture, inférieure à 2 x 2 m, les cintres utilisés ne comportent que 3 éléments alors qu'ils sont censés en comporter 4.

3.3.1 Considérations géométriques

La structure au niveau N260 a une extension de 20 m. Au nord, comme le montre la figure 29, la puissance est plus faible, 3 m, que dans la partie sud où la puissance peut aller jusqu'à près de 9 m. Le pendage est d'environ 80°. Le panneau a déjà été exploité sur 8 m de haut, il est maintenant épuisé. Il ne reste plus de minéralisation si ce n'est un pilier de 3 m de diamètre, non récupérable, laissé en place pour assurer la stabilité des terrains lorsque la puissance était de 9 m. Ce pilier est visible sur le plan ci-dessous.

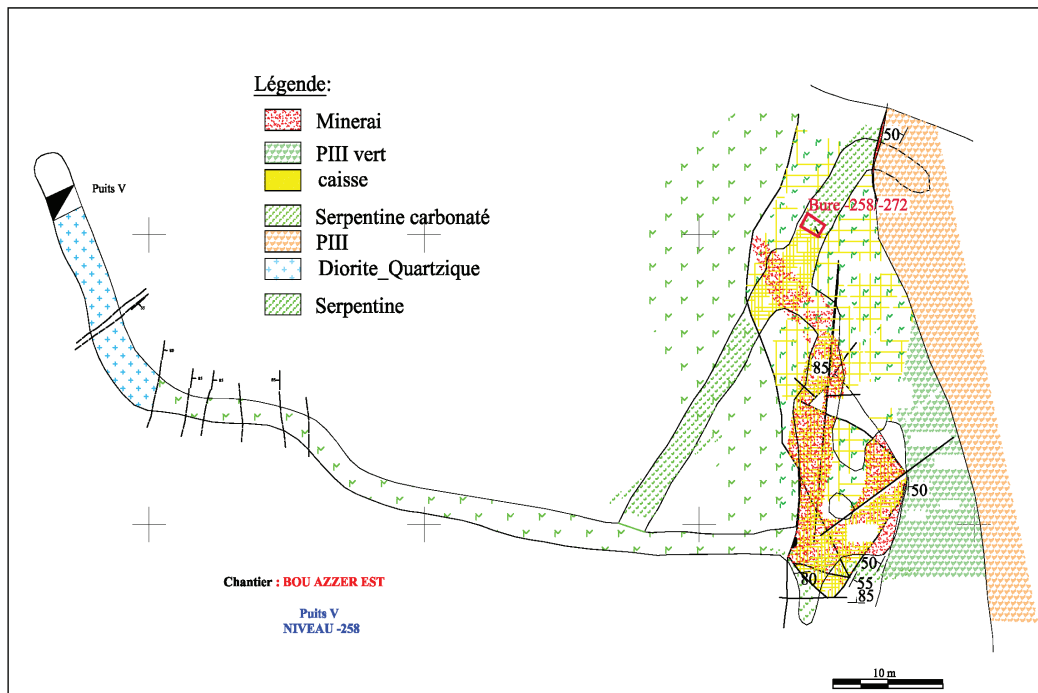


Figure 29: Levé du niveau N260 du puits V de Bou Azzer Est

Au niveau N260, un bure a été creusé pour atteindre les niveaux N272 et N285. La structure a été tracée sur 20 m au niveau N272 et 7 m de haut ont été exploités. Au niveau N285, il n'y a pas de minéralisation, on souhaite ouvrir et exploiter 3 m plus haut au niveau N282. La coupe longitudinale en figure 30 met en évidence ces trois différents niveaux.

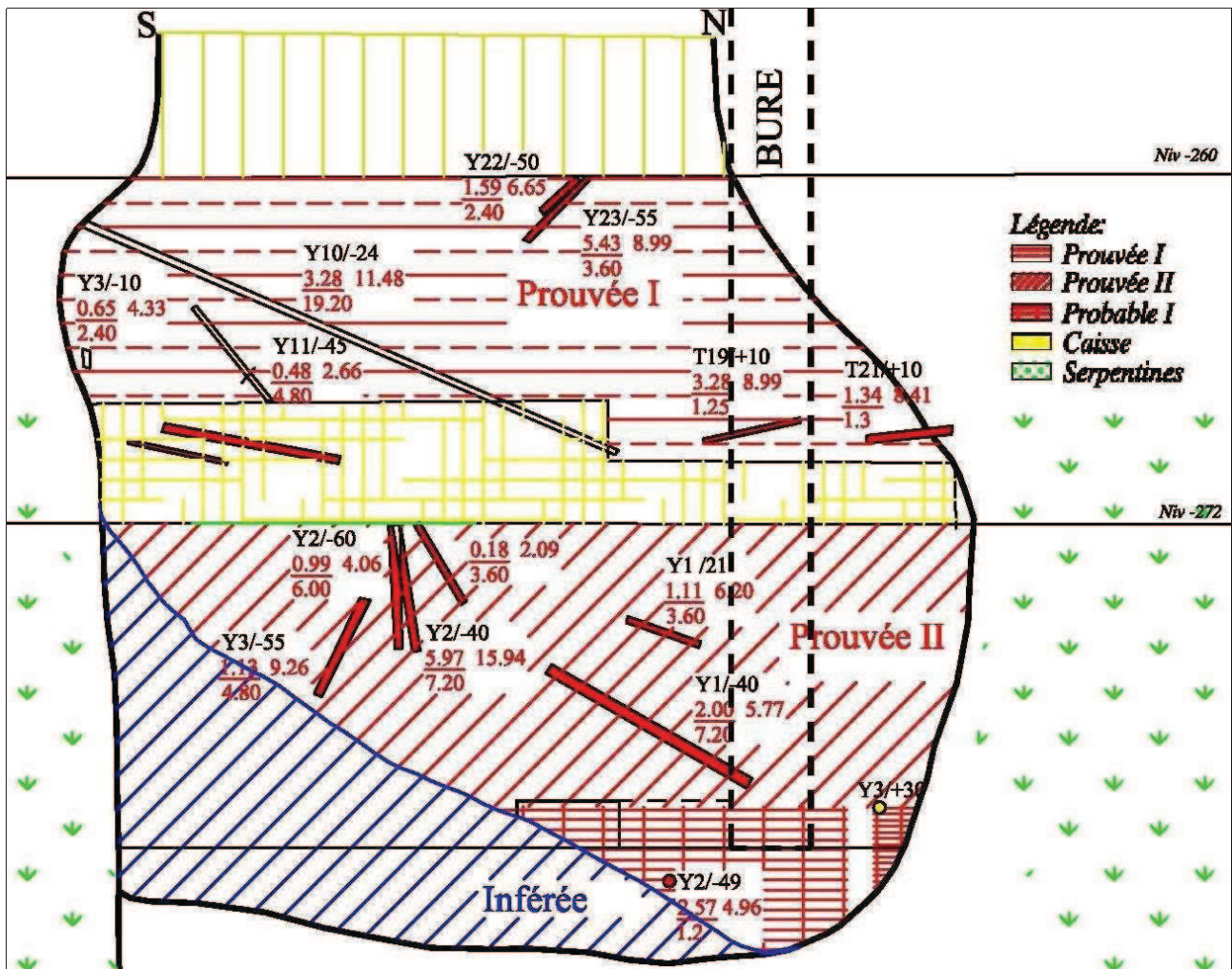


Figure 30: Coupe longitudinale de la structure CM du puits V de Bou Azzer Est en aval de N260

3.3.2 Considérations géomécaniques

La structure minéralisée est de teneur élevée, en moyenne 3 % et elle est très dense, aux alentours de 4. Le minerai est plutôt résistant, et très peu fissuré. Il n'a pas été fait d'essai de compression simple ni de relevé de RQD, cependant, à l'oeil et au marteau, on peut se rendre compte que ce minerai semble avoir un comportement proche de celui de la diorite, qualifiée de « terrain résistant » par l'étude empirique des indicateurs effectuée auparavant. Etant donné le très faible nombre de fissures naturelles, on ne remarque pas de famille de fissures récurrentes. Les quelques fissures présentes sont tout à fait fermées et étanches. On ne peut pas en dire autant des parements. Ces derniers sont composés de serpentines franches, avec par endroits, des laves PIII altérées avec de la chlorite. Ces serpentines franches présentent un grand nombre de fissures naturelles, il s'agit d'un massif sans cohésion. Ces fissures sont ouvertes, parfois l'ouverture dépasse 1 mm, à remplissage argileux tendre. C'est donc tout logiquement que les indicateurs RMR et Q de N. Barton les qualifient tous les deux de « terrains de très mauvaise tenue », avec un RMR de 19 et un Q de 0,01. La présence de PIII altérées n'arrangent rien.

3.3.3 Problèmes rencontrés et soutènement actuel

Au niveau N260, le soutènement mis en place a permis d'exploiter, sans problème, toute la chambre à l'exception d'un pilier de 3 m de diamètre qui n'est pas récupérable. Toutefois, les murs s'effondrent par endroit. Le soutènement mis en place ne suffit pas à les maintenir en place. Ensuite, Managem a tenté d'exploiter à partir du niveau N272. Ils ont donc tracé la structure, exploité sur 7 m de haut et laissé en place les 5 m restants. On observe, en descendant dans la taille du niveau N260, un trou d'environ 5 m de profondeur au sol à l'entrée de la taille, il y a eu un effondrement à cause de l'ouverture du niveau inférieur. Managem ne peut donc pas exploiter plus de minéralisation avec la méthode actuelle. Et pourtant, ils souhaitent également exploiter la minéralisation prouvée au niveau N282 déjà desservi par le bure.

3.3.4 Solutions préconisées

Tout d'abord, compte tenu des contraintes verticales naturelles à cette profondeur, la serpentine se trouve déjà dans son domaine plastique, même sans excavation aux alentours. J'ai donc simulé sur Phase2 les excavations des trois niveaux N260, N272 et N282 à deux endroits dans la structure.

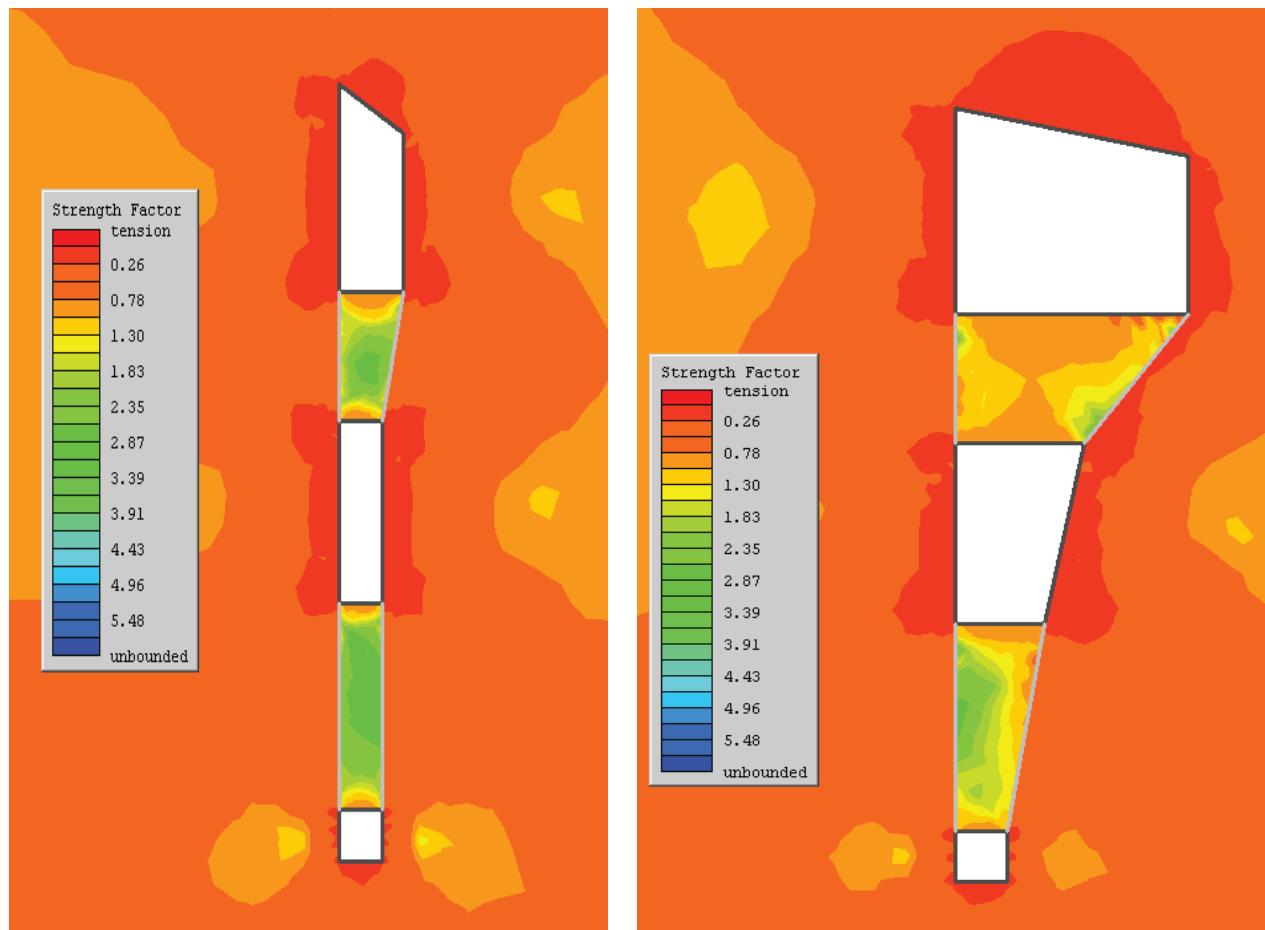


Figure 31: Simulation des excavation de la structure CM
a) Nord de la structure b) Sud de la structure

La puissance de la structure étant particulièrement importante, les ouvertures sont très larges. De plus, la serpentine est très peu résistante. De ces deux particularités, il découle que les soutènements habituels ne vont pas marcher. La seule solution envisageable, est de remblayer totalement les deux niveaux exploités avec du remblai cimenté. Contrairement à d'autres chantiers, le puits V s'y prête mieux. Le remblai cimenté assurera alors la stabilité lors de l'exploitation du niveau N282.

L'étude économique en utilisant un coût de mise en oeuvre du remblai cimenté de 250 dh/m³ montre que ce n'est pas rentable. Le cobalt ainsi récupéré ne justifie pas l'utilisation d'une telle méthode de soutènement. Je propose donc de regarder précisément le coût de mise en oeuvre d'un tel remblai cimenté car la valeur que j'ai choisie est quelque peu arbitraire, bien qu'inspirée des données du remblai cimenté fabriqué à Guemassa.

CONCLUSION

La cellule géotechnique a été créée en 2007 et depuis ce moment-là, le nombre d'accidents et d'incidents a considérablement diminué. Toutefois, certaines zones restaient sensibles et certains chantiers demeuraient inexploitable. Parmi ces chantiers, on retrouve ceux de l'Axe Milon de Bouismass, le Croiseur 2 d'Aghbar et la Structure CM du puits V de Bou Azzer Est. Ces chantiers sont sujets à des problèmes de tenue de terrains de types différents. L'objectif de ce travail était multiple. Il s'agissait d'abord de classer les différents terrains de Bou Azzer puis de trouver des méthodes de soutènement viables permettant d'exploiter les chantiers difficiles dans des conditions de sécurité optimales.

Dans ce cadre, ces trois chantiers ont été étudiés et les conclusions ont été diverses. Tout d'abord, la solution retenue pour le chantier de l'Axe Milon du niveau N250 de Bouismass est celle du boulonnage-grillage détaillé dans ce rapport. Cette solution s'avère tout à fait intéressante autant du point de vue sécurité que d'un point de vue économique ; il ne fait pas de doute que la cellule géotechnique mettra en oeuvre cette procédure de soutènement. En ce qui concerne le chantier du Croiseur 2 du niveau N325 d'Aghbar la solution technique proposée est toute autre. Il s'agit de cadres en bois et de garnissage boisé, dont le diamètre des montants et du chapeau ainsi que l'espacement entre cadres optimaux sont calculés plus haut. Le soutènement proposé est ici un peu plus coûteux (0,77\$/lb) mais malgré ce surcout, l'exploitation reste rentable. Ce soutènement rend donc possible l'exploitation du chantier et assure par la même occasion la sécurité des opérateurs. Enfin, la seule possibilité pour exploiter la Structure CM du niveau N282 du puits V de Bou Azzer Est est de remblayer avec du remblai cimenté les niveaux très proches que sont N260 et N272. Toutefois, cette solution n'est pas économiquement viable, il convient donc d'abandonner le chantier jusqu'à ce que le cours du cobalt soit suffisant ou de chercher d'autres solutions dans de nouvelles directions.

En conclusion, l'objectif est en partie rempli, deux chantiers sur ces trois-là peuvent d'ores et déjà être exploités alors que le dernier n'a pas trouvé de solution permettant son exploitation pour le moment.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] FINE J., *Le soutènement des galeries minières*, Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris, 1998
- [2] BOUVARD-LECOANET A., COLOMBET G. & ESTEULLE F., *Ouvrages souterrains : conception, réalisation et entretien*, Les Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1998

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Schéma organisationnel de Managem.....	8
Figure 2: Localisation de la mine de Bou Azzer.....	9
Figure 3: Schéma explicatif de la méthode d'exploitation par TMR.....	11
Figure 4: Flow sheet simplifié de la laverie.....	13
Figure 5: Flow sheet simplifié du grillage.....	14
Figure 6: Paramètres géotechniques et indices associés pour le calcul du RMR.....	17
Figure 7: Classification des différentes roches de Bou Azzer selon le RMR et le Q-system.....	19
Figure 8: Différentes utilisations du boisage à Bou Azzer : a) piles de bois b) poussards.....	22
Figure 9: a) Profil "Oméga" d'un cintre b) Photo de cintres avec garnissage boisé dans une galerie permanente.....	23
Figure 10: Schéma d'un boulon à coquille.....	23
Figure 11: a) Photo d'un boulon Splitset b) Schéma de mise en place.....	24
Figure 12: a) Sections du Swellex avant et après gonflement b) Séquence d'installation du boulon.....	26
Figure 13: a) Treillis soudé b) Grillage Zigzag.....	26
Figure 14: Levée géologique du niveau -250 à proximité de l'Axe Milon.....	27
Figure 15: Coupe longitudinale de l'Axe Milon entre les niveaux -300 et -200.....	28
Figure 16: Schéma de coupe transversale d'une tranche de l'Axe Milon.....	29
Figure 17: Schéma de soutènement actuel pour l'Axe Milon N250.....	30
Figure 18: Photos montrant la retenue des petits blocs par le treillis soudé.....	31
Figure 19: Simulation de l'Axe Milon a) modélisation effectuée b) résultat "sans remblai" c) résultat "avec remblai".....	32
Figure 20: Schéma de soutènement proposé pour l'Axe Milon N250.....	33
Figure 21: Grillage Zigzag épousant parfaitement la forme de la couronne.....	34
Figure 22: Feuille de calcul des charges pour l'ancien schéma de soutènement.....	36
Figure 23: Coupe longitudinale du Croiseur 2 d'Aghbar entre les niveaux N165 et N365.....	37
Figure 24: Schéma de coupe transversale du Croiseur 2 d'Aghbar au niveau N325.....	38
Figure 25: Schéma de soutènement prévu pour le traçage du Croiseur 2 d'Aghbar au niveau N325.....	39
Figure 26: Modélisation du chapeau d'un cadre en bois.....	41
Figure 27: Tableau récapitulatif le coût du soutènement par cadres en bois d'une tranche du Croiseur 2 en fonction du diamètre du chapeau et de l'espacement associé.....	42
Figure 28: Feuille de calcul du coût de la rentabilité du soutènement boisé du Croiseur 2 d'Aghbar.....	43
Figure 29: Levé du niveau N260 du puits V de Bou Azzer Est.....	45
Figure 30: Coupe longitudinale de la structure CM du puits V de Bou Azzer Est en aval de N260.....	46
Figure 31: Simulation des excavation de la structure CM a) Nord de la structure b) Sud de la structure.....	48
Figure 32: Flow sheet simplifié de l'atelier de mise en solution (AMSG).....	52
Figure 33: Flow Sheet simplifié de l'atelier extraction liquide / liquide.....	53
Figure 34: Feuille de calcul des charges pour l'ancien schéma de soutènement.....	54
Figure 35: Feuille de calcul des charges pour le nouveau schéma de soutènement.....	55

ANNEXES

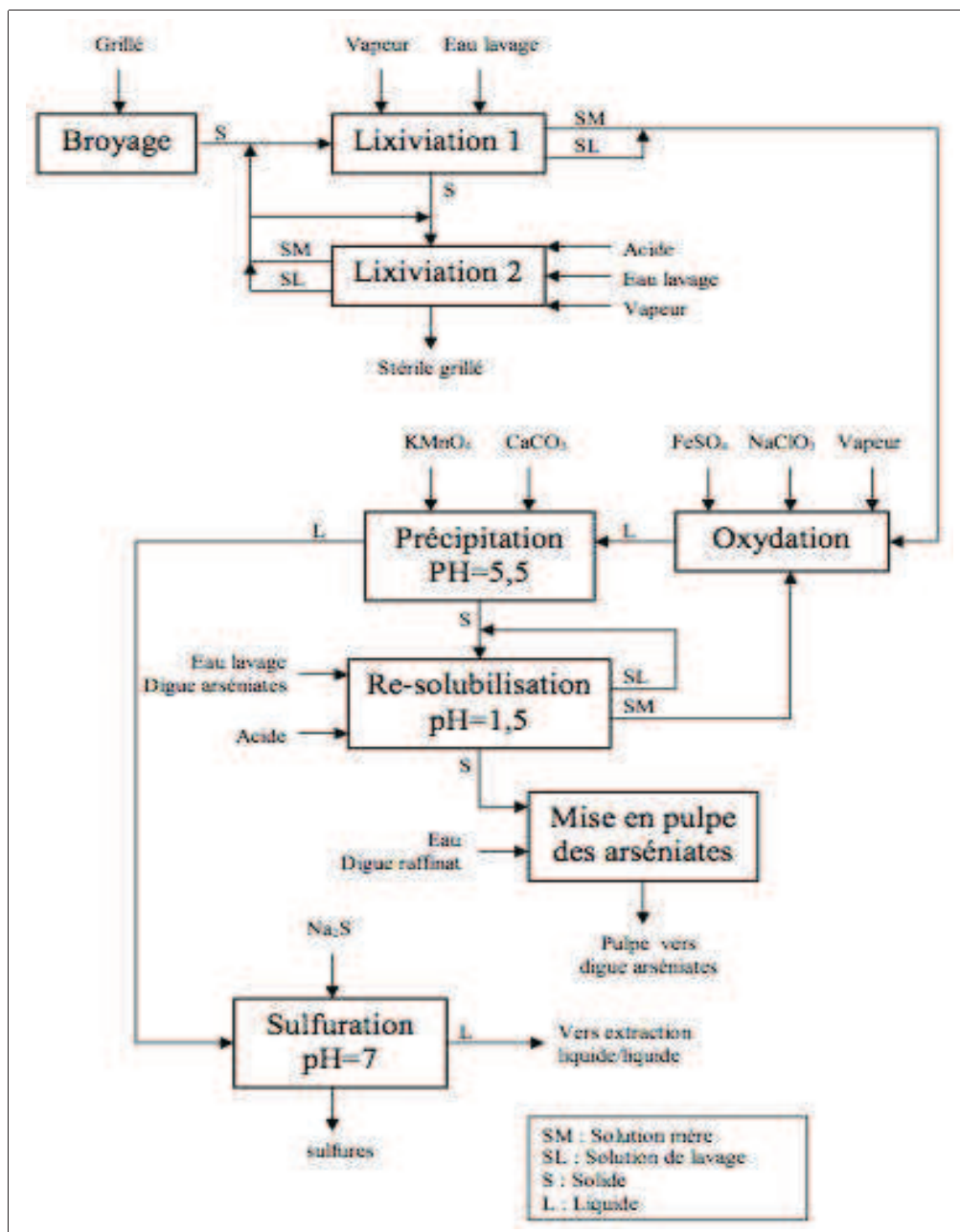


Figure 32: Flow sheet simplifié de l'atelier de mise en solution (AMSG)

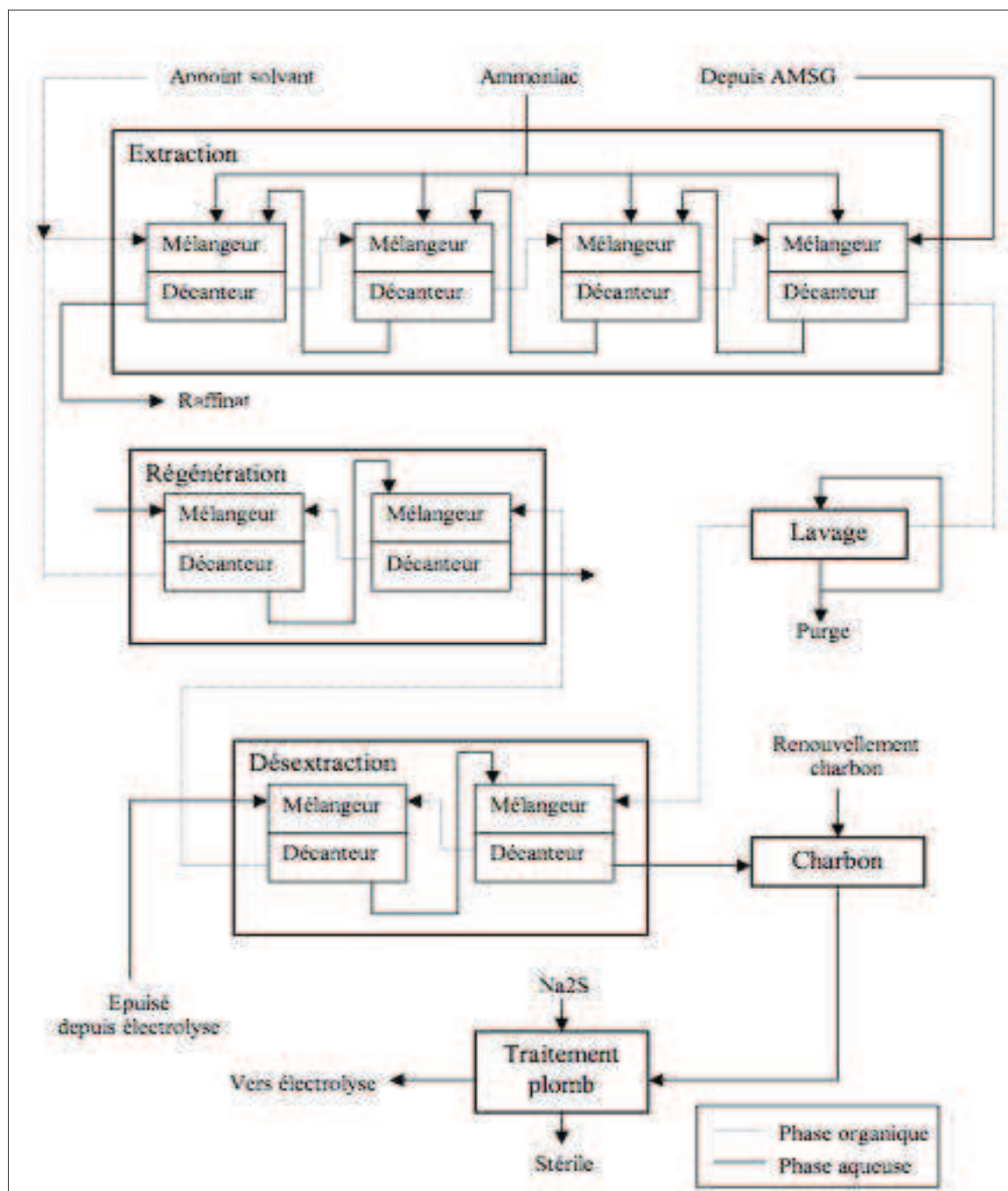


Figure 33: Flow Sheet simplifié de l'atelier extraction liquide / liquide

Charges Fonds

	Q	Prix de revient	Charges
Abattage (T)	3 410,40	144,00	491 097,60
Déblayage (T)	3 528,00	19,00	67 032,00
Remblayage (T)	1 666,00	19,00	31 654,00
Abattage stérile (m3)	455,00	250,00	113 750,00
Soutènement (tranches)	12,50	8 706,00	108 825,00
Roulage (T)	3 528,00	1,50	5 292,00
Extraction (T)	3 528,00	16,00	56 448,00
Transports (T)	3 528,00	12,00	42 336,00

Service commun	3 528,00	5,38	18 980,64
Frais Généraux	3 528,00	12,00	42 336,00
Ensemble Frais Généraux	3 528,00	17,00	59 976,00

1 037 727,24

Charges Usine Bou Azzer (laverie)

Q	Prix de revient	Charges
3 528,00	105,00	370 440,00

Charges Usine Marrakech (hydro)

Q	Prix de revient (/kg)	Charges
25,46	84,00	2 138 476,03

Charges Totales

3 546 643,27

Parité (dh/\$)	8,20	Cours bourse (\$/lb)	23,50
Cash-Cost (\$/lb)	7,70		
Conversion	0,45	Gain \$/lb	15,80

Figure 34: Feuille de calcul des charges pour l'ancien schéma de soutènement

Charges Fonds

	Q	Prix de revient	Charges
Abattage (T)	3 410,40	144,00	491 097,60
Déblayage (T)	3 528,00	19,00	67 032,00
Remblayage (T)	1 666,00	19,00	31 654,00
Abattage stérile (m3)	455,00	250,00	113 750,00
Soutènement (tranches)	12,50	12 891,00	161 137,50
Roulage (T)	3 528,00	1,50	5 292,00
Extraction (T)	3 528,00	16,00	56 448,00
Transports (T)	3 528,00	12,00	42 336,00

Service commun	3 528,00	5,38	18 980,64
Frais Généraux	3 528,00	12,00	42 336,00
Ensemble Frais Généraux	3 528,00	17,00	59 976,00

1 090 039,74

Charges Usine Bou Azzer (laverie)

Q	Prix de revient	Charges
3 528,00	105,00	370 440,00

Charges Usine Marrakech (hydro)

Q	Prix de revient (/kg)	Charges
25,46	84,00	2 138 476,03

Charges Totales

3 598 955,77

Parité (dh/\$)	8,20	Cours bourse (\$/lb)	23,50
Cash-Cost (\$/lb)	7,81		
Conversion	0,45	Gain \$/lb	15,69

Figure 35: Feuille de calcul des charges pour le nouveau schéma de soutènement

TABLE DES MATIERES

<u>RESUME</u>	3
<u>REMERCIEMENTS</u>	4
<u>SOMMAIRE</u>	5
<u>INTRODUCTION</u>	6
 <u>PREMIERE PARTIE PRESENTATION : GENERALE DE L'ACTIVITE MINIERE DE BOU AZZER</u>	7
<u>1 Organisation de Managem</u>	8
<u>2 Caractéristiques des gisements</u>	9
<u>3 Reconnaissance géologique</u>	10
<u>4 La méthode d'exploitation fond</u>	11
<u>5 Le traitement</u>	12
<u>5.1 Fonctionnement de la laverie</u>	12
<u>5.2 Fonctionnement du grillage</u>	13
<u>5.3 Fonctionnement de l'Hydro 2</u>	14
 <u>DEUXIEME PARTIE : LES INSTABILITES MECANQUES</u>	15
<u>1 Caractérisation et classification géomécanique des terrains de Bou Azzer</u>	16
<u>1.1 La classification RMR (Rock Mass Rating)</u>	16
<u>1.2 Le Q-system de N. Barton</u>	17
<u>1.3 La méthode</u>	18
<u>1.4 Les résultats</u>	18
<u>2 Techniques de soutènement actuellement utilisées à Bou Azzer</u>	21
<u>2.1 Le boisage</u>	21
<u>2.2 Les cintres métalliques</u>	22
<u>2.3 Différents types de boulons</u>	23
<u>2.3.1 Le boulon à coquille</u>	23
<u>2.3.2 Le boulon Split Set</u>	24
<u>2.3.3 Le boulon Swellex</u>	25
<u>2.4 Les grillages et treillis soudés</u>	26
<u>3 Etude des situations « à problèmes »</u>	27
<u>3.1 L'Axe Milon N250 de Bouismass</u>	27
<u>3.1.1 Considérations géométriques</u>	27
<u>3.1.2 Considérations géomécaniques</u>	28
<u>3.1.3 Problèmes rencontrés et soutènement actuel</u>	29
<u>3.1.4 Etude de ce soutènement</u>	30
<u>3.1.5 Solutions préconisées</u>	32
<u>3.1.6 Coût de ce soutènement</u>	35
<u>3.2 Le Croiseur 2 N325 d'Aghbar</u>	36
<u>3.2.1 Considérations géométriques</u>	37
<u>3.2.2 Considérations géomécaniques et difficultés rencontrées</u>	38
<u>3.2.3 Solutions préconisées</u>	40
<u>3.2.3.1 Cadres en bois</u>	40

<u>3.2.3.2 Boulonnage et béton projeté</u>	43
<u>3.3 La Structure CM N260 de Bou Azzer Est (Puits V)</u>	44
<u>3.3.1 Considérations géométriques</u>	45
<u>3.3.2 Considérations géomécaniques</u>	46
<u>3.3.3 Problèmes rencontrés et soutènement actuel</u>	47
<u>3.3.4 Solutions préconisées</u>	47
<u>CONCLUSION</u>	49
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	50
<u>LISTE DES FIGURES</u>	51
<u>ANNEXES</u>	52
<u>TABLE DES MATIERES</u>	56